



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Sascha Kelch

Analyse und Auslegung eines Wellenabsorbers mittels Strömungssimulationen

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Sascha Kelch

**Analyse und Auslegung eines
Wellenabsorbers mittels
Strömungssimulationen**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Energie und Anlagensysteme
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Peter Wulf
Zweitprüferin: Prof. Dr.-Ing. Vera Schorbach

Abgabedatum: 05.08.2020

Sascha Kelch

Thema der Bachelorthesis

Analyse und Auslegung eines Wellenabsorbers mittels Strömungssimulationen.

Stichworte

Wellenabsorber, Wellenkanal, OpenFOAM, Strömungssimulation, Wasserwellen, Mehrphasenströmung

Kurzzusammenfassung

Es wird mittels der numerischen Strömungssimulation ein Wellenabsorber ausgelegt und analysiert. Zunächst wird eine Auswertungsmethode entwickelt. Die Auswertungsmethode basiert auf einem Vergleich zwischen idealer und simulierter Welle. Danach werden verschiedene Simulationsfälle erstellt. Dabei werden frühere Arbeiten berücksichtigt. Im Anschluss werden die Simulationen ausgewertet und ein Fazit gezogen.

Sascha Kelch

Title of the paper

Analysis and dimensioning of a wave absorber using Computational Fluid Dynamics.

Keywords

wave absorber, wave flume, OpenFOAM, Computational Fluid Dynamics, water waves, Multiphase Fluid Flow

Abstract

A wave absorber is designed and analysed using computational fluid dynamics. First an analysis method is developed. The analysis method is based on a comparison between simulated and measured wave. Then different simulation cases are created, previous work is considered. At the end the simulations being evaluated, and a conclusion is made.

Aufgabenstellung

Prof. Dr.-Ing. Peter Wulf
Department Maschinenbau und Produktion



April 2020

Bachelorthesis

Analyse und Auslegung eines Wellenabsorbers mittels Strömungssimulationen

Im Zentrum für Energietechnik an der HAW Hamburg wird ein Wellenkanal für Untersuchungen von Wellenenergiewandlern betrieben. Um ein Zurücklaufen der Wellen in dem mit 10 m Länge relativ kurzen Kanal zu vermeiden oder zumindest stark zu dämpfen, soll ein passiver Wellenabsorber auf der dem Wellenerzeuger gegenüberliegenden Kanalseite eingesetzt werden, in dem die Wellen auslaufen. Wünschenswert wäre eine einfache robuste Bauweise, die relativ wenig Bauraum beansprucht (ca. 1/5 der Kanallänge) und ein breites Spektrum von Wellen in der Amplitude dämpfen kann.

Der Aufbau des Wellenabsorbers basiert daher auf drei Funktionsprinzipien, die zusammen die potentielle und kinetische Energie der Wellen dämpfen sollen:

- einer geneigten Platte (mit/ohne Öffnungen) zur Reduzierung der effektiven Wassertiefe im Auslaufbereich der Wellen (Brandungszone),
- einer zusätzlichen Aufrauung der Plattenoberfläche mit Gittern (Kunststoff-Waben),
- einer Kaskade von Halbschalen, die auf und vor der Platte senkrecht im Wasser stehen und mit der abgerundeten Seite den anlaufenden Wellen zugewandt sind.

Im Rahmen dieser Arbeit soll das Funktionsprinzip des Wellenabsorbers mit Ansätzen der Numerischen Strömungssimulation (CFD) untersucht werden. Dazu ist zuerst die optimale Ausrichtung und Länge der Platte zu bestimmen (Parameter: Neigungswinkel, Länge, mit/ohne Öffnungen), dann ist die zusätzliche Wirkung der Aufrauung für eine vorgegebene Wabenform zu untersuchen und abschließend die zusätzliche Dämpfung der Halbschalenstruktur (Parameter: Anzahl, örtliche Platzierung, Größe). Um die einzelnen Wirkungen zu erfassen, ist zu Beginn ein grundsätzliches Setup im CFD-Modell mit einer geeigneten Erfassung des Wellenrücklaufs festzulegen. Ein grundsätzliches skriptbasiertes CFD-Modell wird vom Betreuer zur Verfügung gestellt. Dies umfasst die skriptbasierte Geometrieerzeugung und Vernetzung sowie den Modellaufbau in *OpenFOAM*® mit dem Solver *interFoam*. Frühere Arbeiten zu diesem Themenfeld ([1], [2], [3]) sollen beachtet werden.

In Abstimmung mit dem Betreuer sollen folgende Teilaufgaben bearbeitet werden:

- Einarbeitung in das Thema
- Übernahme des CFD-Modells und Festlegung des grundsätzlichen Setups
- Erstellung der einzelnen Berechnungsvarianten zu den o.g. Funktionsprinzipien
- Simulationsdurchführung für 4 Betriebsarten mit den Eigenschaften:
 - Füllhöhenvariation d_0 : 0.5m, 1m
 - Wellenvariation (L=Länge, H=Höhe): L = 2m mit H = 0.2m, L = 1m mit H = 0.15m
- Auswertung, grafische Darstellung und Diskussion der Ergebnisse
- Bewertung und Optimierung des Absorbers und der einzelnen Funktionsprinzipien

Die Vorgehensweise, die Modelleigenschaften, die erzielten Ergebnisse und die gewonnenen Erkenntnisse sind unter Beachtung der formalen Anforderungen an das wissenschaftliche Schreiben strukturiert darzustellen. Die Leitlinien des Dep. MuP zur formalen Gestaltung der Arbeit sind zu beachten. Der Arbeit ist ein Datenträger (CD oder DVD) mit der Arbeit selbst (im PDF-Format) sowie allen relevanten Dateien beizulegen.

- [1] C. Bauck, C. Hansen: Entwurf und Auslegung eines Wellenabsorbers für einen Wellenkanal. Hausarbeit, HAW Hamburg, 2011.
- [2] D. Pieper: Modellierung und Simulation eines Wellenerzeugers für eine maritime Versuchsanlage mit CFD-Methoden. Bachelorarbeit, HAW Hamburg, 2012.
- [3] T. Warnecke: Simulation und Optimierung eines Wellenabsorbers für den Wellenkanal der HAW. Studienarbeit, HAW Hamburg, 2019.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis.....	viii
Abbildungsverzeichnis.....	x
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen.....	2
2.1 Wellentheorie.....	2
2.1.1 Eigenschaften von Schwerewellen.....	2
2.1.2 Wellentheorie nach Airy	4
2.1.3 Geschwindigkeiten und Partikelbahnen	4
2.1.4 Wellenenergie.....	6
2.1.5 Reflexion von Wasserwellen	7
2.2 Funktionsprinzipien der einzelnen Wellenabsorber	7
2.2.1 Shoaling und Wellenbrechen	7
2.2.2 Diffraktion	11
2.3 Grundlagen der numerische Strömungsmechanik	12
2.3.1 Kontinuitätsgleichung.....	12
2.3.2 Navier-Stokes-Gleichung für inkompressible Fluide	13
2.3.3 Mehrphasenströmung	13
2.4 Versuchsplanung.....	14
3 Simulation.....	16
3.1 Netzgenerierung.....	17
3.2 Randbedingungen	18
3.3 Input Daten.....	19
3.4 Nachbildung der Welleneigenschaften.....	19
4 Ermittlung der Absorber-Güte.....	23
5 Erstellung der Simulationsfälle.....	27
5.1 Relevante Ergebnisse früherer Arbeiten	27
5.2 Simulationsfälle	29
5.2.1 Neigungswinkel ohne Abstand zur Rückwand	30
5.2.2 Neigungswinkel mit Abstand zur Rückwand.....	31
5.2.3 Vertikale Verschiebung	31
5.2.4 Horizontale Verschiebung	32
5.2.5 Öffnungen und Wabenstruktur	33

5.2.6	Nenndurchmesser und Kaskadenanzahl der Halbschalen.....	34
6	Auswertung der Simulationsfälle.....	36
6.1	Auswertung der Simulationsfälle des Strandabsorbers	36
6.1.1	Variation des Neigungswinkels ohne Abstand zur Rückwand	36
6.1.2	Variation des Neigungswinkels bei vorhandenem Abstand zur Rückwand	38
6.1.3	Vertikale Verschiebung	41
6.1.4	Horizontale Verschiebung.....	42
6.1.5	Öffnungen und Wabenstruktur.....	43
6.2	Auswertung der Simulationsfälle für die Halbschalenstruktur.....	45
6.2.1	Durchmesser der Halbschalenstrukturen	45
6.2.2	Anzahl der Halbschalenstrukturen	46
6.2.3	Variation der Plattenlänge.....	47
7	Fazit	49
	Quellenverzeichnis	51
	Anhang A Vollständig Auswertungsunterlagen	52
	Anhang B Auslenkung der freien Oberfläche	60
	Anhang C Partikelgeschwindigkeit vor und hinter der Platte.....	64
	Anhang D Anhang der CD	65

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A	m	Amplitude
AG	$\%$	Absorber-Güte
c	$\frac{m}{s}$	Phasengeschwindigkeit
c_{gr}	$\frac{m}{s}$	Gruppengeschwindigkeit
d	m	Wassertiefe
\bar{E}_{ges}	$\frac{J}{m^2}$	Mittlerer Energiegehalt, pro Flächeneinheit
\bar{E}_{pot}	$\frac{J}{m^2}$	Potentielle Wellenenergie, pro Flächeneinheit
\bar{E}_{kin}	$\frac{J}{m^2}$	Kinetische Wellenenergie, pro Flächeneinheit
\dot{E}	$\frac{J}{m \cdot s}$	Mittlerer Energiefluss
g	$\frac{m}{s^2}$	Erdbeschleunigung
H	m	Wellenhöhe
k	m	Wellenzahl
K_R	$[-]$	Reflexionskoeffizient
L	m	Wellenlänge
L_k	m	Länge des Wellenkanals
m	kg	Masse
N	$[-]$	Anzahl der Messwerte
n_{start}	$[-]$	Startwert der Auswertung
n_{end}	$[-]$	Endwert der Auswertung
S	$[-]$	Wellensteilheit
S_{Grenz}	$[-]$	Grenzsteilheit
t	s	Zeit

t_{start}	s	Startzeitpunkt der Auswertung
t_{end}	s	Endzeitpunkt der Auswertung
$\Delta t_{AnlaufPaddel}$	s	Zeit für das Anlaufen des Paddels
T	$\frac{1}{s}$	Periodendauer
u, v, w	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit in x, y, z-Richtung
\vec{v}	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeitsvektor
x, y, z	$[-]$	Kartesische Koordinaten
α	$[-]$	Zellfüllgrad
ζ_0	$[-]$	Iribarren-Zahl
$\eta(x, t)$	m	Auslenkung der freien Oberfläche
μ	$\frac{kg}{m \cdot s}$	Dynamische Viskosität
π	$[-]$	Kreiszahl
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte
ω	$\frac{1}{s}$	Wellenkreisfrequenz

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wellenkategorie mit Gültigkeitsbereich.....	3
Tabelle 2: Brecherform mit zugehöriger Iribarren-Zahl (für Welleneigenschaften im Tiefwasser).....	10
Tabelle 3: Betriebsarten: B1, B2, B3, B4 mit den jeweiligen Welleneigenschaften und kategorischen Zugehörigkeiten.....	19
Tabelle 4: Welleneigenschaften: Betriebsarten B1, B2, B3 und B4 1m hinter dem Einlass gemessen.....	20
Tabelle 5: Startzeiten t_{start} für die Auswertung.....	25
Tabelle 6: Endzeiten t_{end} für die Auswertung.....	25
Tabelle 7: Einstellungen: Variation des Neigungswinkels und der vertikalen Verschiebung ohne Abstand zur Rückwand. Betriebsart: B2 und B4.....	30
Tabelle 8: Einstellungen: Variation des Neigungswinkels und der vertikalen Verschiebung ohne Abstand zur Rückwand. Betriebsart: B1 und B3.....	31
Tabelle 9: Einstellungen: Variation des Neigungswinkels bei konstantem Abstand zur Rückwand und einheitlicher Freibordhöhe (0,09 m). Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.....	31
Tabelle 10: Einstellungen: Variation der vertikalen Verschiebung bei ausgewählten Neigungswinkeln und konstanten Abstand zur Rückwand. Betriebsart: B1 und B3.....	32
Tabelle 11: Einstellungen: Variation der vertikalen Verschiebung bei ausgewählten Neigungswinkeln und konstanten Abstand zur Rückwand. Betriebsart: B2 und B4.....	32
Tabelle 12: Einstellungen: Variation der horizontalen Verschiebung, bei einem ausgewählten Neigungswinkel und konstanten Abstand zum Boden. Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.....	32
Tabelle 13: Einstellungen: Variationen der Öffnungen bei einem ausgewählten Neigungswinkel und konstanten Abstand zur Rückwand. Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.....	33
Tabelle 14: Einstellungen: Waben bei einem ausgewählten Neigungswinkel und konstanten Abstand zur Rückwand mit/ohne Öffnungen. Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.....	34
Tabelle 15: Einstellungen: Variationen des Nenndurchmessers der Halbschalen bei einheitlicher Kaskadenanzahl (n_K). Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.....	34
Tabelle 16: Einstellungen: Variationen der Kaskadenanzahl bei ausgewählten Nenndurchmesser. Betriebsart B1, B2, B3 und B4.....	35
Tabelle 17: Einstellungen: Variationen der Plattenlänge bei einheitlicher Freibordhöhe und Neigungswinkel mit zugeschalteten Halbschalen (DN 160 mm), Kaskadenanzahl von 4. Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.....	35
Tabelle 18: Auswertung: Variation des Neigungswinkels und der vertikalen Verschiebung ohne Abstand zur Rückwand/ Boden. Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.....	37
Tabelle 19: Auswertung: Variation des Neigungswinkels bei konstantem Abstand zur Rückwand und einheitlicher Freibordhöhe (0,09 m). Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.....	39
Tabelle 20: Auswertung: Variation der vertikalen Verschiebung bei ausgewählten Neigungswinkeln und konstantem Abstand zur Rückwand. Betriebsart: B1 und B3.....	41

Tabelle 21: Auswertung: Variation der vertikalen Verschiebung bei ausgewählten Neigungswinkeln und konstanten Abstand zur Rückwand. Betriebsart: B2 und B4.	42
Tabelle 22: Auswertung: Variation der horizontalen Verschiebung, bei einem ausgewählten Neigungswinkel und konstanten Abstand zum Boden. Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.....	43
Tabelle 23: Auswertung: Variationen der Öffnungen bei einem ausgewählten Neigungswinkel und konstanten Abstand zur Rückwand. Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.	43
Tabelle 24: Auswertung: Waben bei einem ausgewählten Neigungswinkel und konstanten Abstand zur Rückwand mit/ohne Öffnungen. Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.	44
Tabelle 25: Auswertung: Variation des Durchmessers der Halbschalenstrukturen. Betriebsarten: B1, B2, B3 und B4.	45
Tabelle 26: Auswertung: Variation der Kaskadenanzahl bei ausgewählten Nenndurchmesser. Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.....	47
Tabelle 27: Auswertung: Variationen der Plattenlänge bei einheitlicher Freibordhöhe und Neigungswinkel. Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.....	47
Tabelle 28: A1.1. Auswertungsunterlagen-Variation des Neigungswinkels ohne Abstand zur Rückwand.	52
Tabelle 29: A1.2. Auswertungsunterlagen-Variation des Neigungswinkels bei vorhandenem Abstand zur Rückwand.	53
Tabelle 30: A1.3. Auswertungsunterlagen-Vertikale Verschiebung.	54
Tabelle 31: A1.4. Auswertungsunterlagen-Horizontale Verschiebung.	55
Tabelle 32: A1.5. Auswertungsunterlagen-Öffnungen.....	56
Tabelle 33: A1.6. Auswertungsunterlagen-Wabenstruktur. Geometrische Parameter der hier gewählten Öffnungen: $nL = 4$, $nW = 3$ und $D = 0,1m$	56
Tabelle 34: A2.1. Auswertungsunterlagen-Variation des Durchmessers der Halbschalenstrukturen bei fester Kaskadenanzahl $nK= 5$. Geometrische Parameter der hier gewählten Öffnungen: $nL = 4$, $nW = 3$ und $D = 0,1m$	57
Tabelle 35: A2.2. Auswertungsunterlagen-Variation der Kaskadenanzahl (nK). Geometrische Parameter der hier gewählten Öffnungen: $nL = 4$, $nW = 3$ und $D = 0,1m$	58
Tabelle 36: A2.3. Auswertungsunterlagen-Variation der Plattenlänge. Geometrische Parameter der hier gewählten Öffnungen: $nL = 4$, $nW = 3$ und $D = 0,1m$	59

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Welleneigenschaften einer Welle nach linearer Wellentheorie inspiriert von [1].....	2
Abbildung 2: Schematische Darstellung von Tief- und Flachwasserwellen [4].	3
Abbildung 3: Partikelbahnen und Orbitalgeschwindigkeiten bei festen Phasenwinkel und Wassertiefen [1].	5
Abbildung 4: Überlagerung von zwei Wellen mit unterschiedlicher Frequenz, zu einer Wellengruppe [3].....	6
Abbildung 5: Zusammenhang zwischen Sohlhöhe und Wellenlänge bei abnehmenden Strandabstand [3].	8
Abbildung 6: Abnehmende Tiefwasseramplitude einer aus dem Tiefwasser auf einen Strand auflaufenden Welle infolge des Shoaling – Effektes [3].	9
Abbildung 7: Schematische Darstellung eines Sturzbrechers mit Irbarren-Zahl (ζa) bzw. ($\zeta 0$) (für Welleneigenschaften im Tiefwasser) und (ζb) (Welleneigenschaften beim brechen) [7].	11
Abbildung 8: Diffraktion einer auf ein Hindernis zulaufenden Welle [2].....	11
Abbildung 9: Ausbildung eines Interferenzmusters infolge der Diffraktion von Wasserwellen an Öffnungen, welche schmaler als die Wellenlänge sind [6].	12
Abbildung 10: Schematische Darstellung des Zellfüllgrads (α) ($0 \leq \alpha \leq 1$) [12].....	14
Abbildung 11: Prinzip der Einfaktor-Methode mit zwei Einflussgrößen (x_1 und x_2) [13]. .	15
Abbildung 12: Berechnungsgebiet mit Aktivierung aller Absorbervarianten: Platte, Platte mit Öffnungen/ Aufrauung und Halbschalenstrukturen.	16
Abbildung 13: Netz mit gebietsweisen Verfeinerungen im Bereich der freien Oberfläche (1), kurz vor dem Gebiet des Absorbers (2) und im Gebiet des Absorbers (3).	17
Abbildung 14: Berechnungsgebiet mit Rändern und Koordinatensystem. Die offene Seite ist der Symmetrierand.	18
Abbildung 15: Nachbildung einer Welle mit $H = 0,2m$ und $L = 2m$ über $t = 20s$ bei der Erfassung an der Position $x = 1m$	21
Abbildung 16: Nachbildung einer Welle mit $H = 0,2m$ und $L = 2 m$ über $t = 20s$ bei der Erfassung an der Position $x = 1m$ im Vergleich mit einer Wellenkanallänge von $Lk = 4m$ (blaue Kurve) und einer Wellenkanallänge von $Lk = 5m$ (gelbe Kurve).	21
Abbildung 17: Nachbildung einer Welle mit $L = 2m$ und $t = 0,1m$ über $t = 20s$ bei der Erfassung an der Position $x = 1m$	22
Abbildung 18: Position der Messstellen im Wellenkanal. Der Einlass befindet sich links. .	23
Abbildung 19: Oberflächen Auslenkung einer idealen Airy-Welle (Blau) und einer gemessenen Airy-Welle (Orange) mit $H = 0,2m$ und $L = 2m$ simuliert über $t = 20s$ mit ausgeglichener Phasenverschiebung. Gemessen an der Position $x = 2m$	26
Abbildung 20: Reflexionskoeffizient über Wellensteilheit bei einem passiven Strandabsorber nach [10].	28
Abbildung 21: Geometrische Parameter der Platte: Vertikale Verschiebung (vV), horizontale Verschiebung (hV), Neigungswinkel (α) und Plattenlänge (L).	30

Abbildung 22: Geometrische Parameter der Platte mit Öffnungen: Plattenlänge L , Breite b , Öffnungsdurchmesser D , beispielhaft mit $nL = 5$ und $nW = 2$.	33
Abbildung 23: Ausgewählte Halbschalenstruktur in der Draufsicht mit DN 160 mm nach [4].	34
Abbildung 24: Exemplarische Darstellung eines Sturzbrecher. Gezeigt an Betriebsart B2 mit den geometrischen Parametern: $\alpha = 25^\circ$, $vV = 0,350m$ und $hV = 0,187m$.	37
Abbildung 25: Auf die Platte auflaufende Welle mit Erreichen der Rückwand. Gezeigt an Betriebsart B2 mit den geometrischen Parametern: $\alpha = 25^\circ$; $vV = 0,350m$ und $hV = 0,187m$.	38
Abbildung 26: Betriebsart B1 mit den geometrischen Parametern: $\alpha = 20^\circ$, $vV = 0,406m$ und $hV = 0,4m$ bei $t = 7,8s$. Wellen laufen unter der Platte durch.	39
Abbildung 27: Betriebsart B1 mit den geometrischen Parametern: $\alpha = 20^\circ$, $vV = 0,1m$ und $hV = 0m$ bei $t = 16,2s$. Verhinderung der Wasserspiegelauslenkung durch Lufteinschluss zwischen Wasseroberfläche und Platte.	40
Abbildung 28: Überströmendes Wasser. Abstand zur Rückwand vorhanden. Betriebsart: B2 mit den geometrischen Parametern: $\alpha = 25^\circ$ und $hV = 0,4m$.	40
Abbildung 29: B1.1. Auslenkung der freien Oberfläche-B1. Variation des Neigungswinkels bei vorhandenem Abstand zur Rückwand. Gemessen an der Stelle $x = 2m$. Geometrische Parameter entsprechend Tabelle 29.	60
Abbildung 30: B1.2. Auslenkung der freien Oberfläche-B2. Variation des Neigungswinkels bei vorhandenem Abstand zur Rückwand. Gemessen an der Stelle $x = 2m$. Geometrische Parameter entsprechend Tabelle 29.	60
Abbildung 31: B1.3. Auslenkung der freien Oberfläche-B3, Variation des Neigungswinkels bei vorhandenem Abstand zur Rückwand. Gemessen an der Stelle $x = 2m$. Geometrische Parameter entsprechend Tabelle 29.	61
Abbildung 32: B1.4. Auslenkung der freien Oberfläche-B4, Variation des Neigungswinkels bei vorhandenem Abstand zur Rückwand. Gemessen an der Stelle $x=2m$. Geometrische Parameter entsprechend Tabelle 29.	61
Abbildung 33: B2.1. Auslenkung der freien Oberfläche-B1. Vergleich zwischen Platte mit Öffnungen (siehe Tabelle 32 Fall: $nL = 4$, $nW = 3$ und $D = 0,1m$.) und Platte mit Öffnungen und Halbschalen (Geometrische Parameter nach Tabelle 34), bei verschiedenen Nenndurchmessern. Gemessen an der Stelle $x = 2m$.	62
Abbildung 34: B2.2. Auslenkung der freien Oberfläche-B2. Vergleich zwischen Platte mit Öffnungen (siehe Tabelle 32 Fall: $nL = 4$, $nW = 3$ und $D = 0,1m$.) und Platte mit Öffnungen und Halbschalen (Geometrische Parameter nach Tabelle 34), bei verschiedenen Nenndurchmessern. Gemessen an der Stelle $x = 2m$.	62
Abbildung 35: B2.3. Auslenkung der freien Oberfläche-B3. Vergleich zwischen Platte mit Öffnungen (siehe Tabelle 32 Fall: $nL = 4$, $nW = 3$ und $D = 0,1m$.) und Platte mit Öffnungen und Halbschalen (Geometrische Parameter nach Tabelle 34), bei verschiedenen Nenndurchmessern. Gemessen an der Stelle $x = 2m$.	63
Abbildung 36: B2.4. Auslenkung der freien Oberfläche-B4. Vergleich zwischen Platte mit Öffnungen (siehe Tabelle 32 Fall: $nL = 4$, $nW = 3$ und $D = 0,1m$.) und Platte mit Öffnungen und Halbschalen (Geometrische Parameter nach Tabelle 34), bei verschiedenen Nenndurchmessern. Gemessen an der Stelle $x=2m$.	63

Abbildung 37 C1. Partikelgeschwindigkeiten über $t = 20s$ für Betriebsart B2 mit $nL = 8$, $nW = 6$ und $D = 0,05m$ vor ($x_1 = -0,4m$) und hinter der Platte ($x_2 = 1,4m$) in einer Höhe von $z = 0,8m$ gemessen.64

1 Einleitung

Im Zentrum für Energietechnik an der HAW Hamburg wird an einem Wellenkanal gearbeitet. Der Kanal soll dazu genutzt werden Wellenkraftwerke zu untersuchen. Damit Versuche an dem Wellenkanal durchgeführt werden können, ist es nötig, dass die generierten Wellen am Ende des Kanals nicht reflektiert werden. Durch eine Reflexion der Wellen würde es zur Überlagerung von reflektierter und generierter Welle kommen, dadurch würde die Welle von ihrer idealen Form abweichen. Um die Reflexion am Kanal Ende zu vermeiden ist ein Wellenabsorber notwendig.

Aufgrund der relativ kurzen Länge des Wellenkanals von 10 m steht nur ein Bauraum von ungefähr 2 m zu Verfügung.

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es einen Wellenabsorber auszulegen, welcher trotz des begrenzten Bauraums ein breites Spektrum von Wellen absorbieren kann. Der Absorber besteht aus verschiedenen Komponenten, welche alle zu einer Dämpfung der Wellen beitragen sollen.

Um eine möglichst gute Absorption der Wellen zu erzielen, wird versucht die einzelnen Komponenten bezogen auf unterschiedliche geometrische Einstellungen zu optimieren. Die zu untersuchenden Absorber Komponenten sind: eine Platte, eine Platte mit zusätzlichen Öffnungen/ Aufrauung der Plattenoberfläche und Halbschalenstrukturen.

Die Untersuchungen werden mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation durchgeführt. Eine Untersuchung des Absorbers am realen Wellenkanal wäre sehr kosten- und zeitintensiv. Es müssten alle Absorbervarianten, zum Beispiel Platten mit verschiedenen großen Öffnungen oder Halbschalenstrukturen mit verschiedenen Nenndurchmessern, erworben werden. Die verschiedenen Varianten müssten dann bei jeder Untersuchung ausgetauscht werden.

Für die Auslegung und Analyse des Wellenabsorbers wird zunächst ein grundsätzliches Set-Up entwickelt, durch welches es möglich ist, die Absorptionsfähigkeit des Absorbers zu bewerten. Im Anschluss werden verschiedene Simulationsfälle erstellt. Bei der Erstellung der Simulationsfälle werden frühere Arbeiten, welche sich auch mit Wellenabsorbern für den Wellenkanal der HAW Hamburg beschäftigt haben, berücksichtigt. Am Ende werden die Simulationsergebnisse ausgewertet und ein Fazit gezogen.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel wird auf die Grundlagen der Wellentheorie, die Funktionsprinzipien der Wellenabsorber, die Grundlagen der numerischen Strömungsmechanik und zum Schluss auf die Versuchsplanung eingegangen.

2.1 Wellentheorie

Auf Herleitungen wird hier verzichtet, es sind aber Herleitungen unter anderen zur Wellentheorie nach Airy in [2] und [3] zu finden.

Wellen entstehen durch die äußere Einwirkung von Kräften, welche zur Verformung der Wasseroberfläche entgegen der Erdbeschleunigung und der Oberflächenspannung führen. Wasserwellen werden als Oberflächenwellen bezeichnet.

2.1.1 Eigenschaften von Schwerewellen

Die wichtigsten Eigenschaften, welche eine Welle beschreiben sind Wellenlänge (L), Periodendauer (T), Auslenkung der freien Oberfläche $\eta(x, t)$ und Wellenhöhe (H). All diese Eigenschaften sind in Abbildung 1 dargestellt.

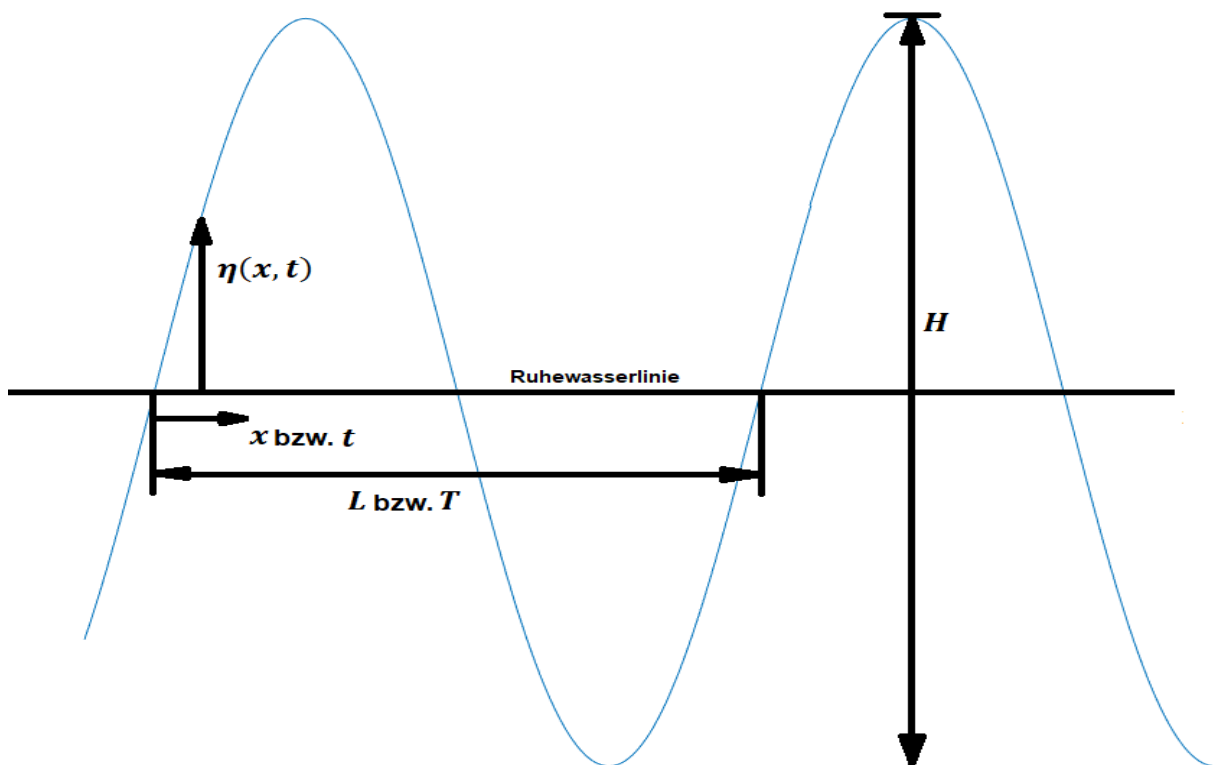


Abbildung 1: Welleneigenschaften einer Welle nach linearer Wellentheorie inspiriert von [1].

Der sich oberhalb der Ruhewasserlinie befindliche Teil der Welle wird als Wellenberg bezeichnet. Der sich unterhalb der Ruhewasserlinie befindliche Teil der Welle wird als Wellental bezeichnet.

Wellen lassen sich in Flachwasserwellen, Tiefwasserwellen und Wellen mittlerer Tiefe einteilen. Die Partikel einer Tiefwasserwelle bewegen sich auf geschlossenen Kreisbahnen. Somit erfolgt nach der Wellentheorie kein Massentransport in Ausbreitungsrichtung. Die Geschwindigkeit von Tiefwasserwellen nimmt mit abnehmender Entfernung zum Boden (auch Sohle genannt) ab. Sobald die Wassertiefe unter $L/2$ sinkt, treten Interaktionen zwischen Boden und Wasserpartikeln auf. Dadurch flacht die Kreisbahn kontinuierlich ab. Bei Verringerung der Wassertiefe gehen die Partikelbahnen zunächst in eine elliptische Bahn über. Im Flachwasser führen die Partikel translatorische Bewegungen aus. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2 dargestellt. Es ist zu erkennen das die Partikelgeschwindigkeit von Tiefwasserwellen über die Tiefe gesehen stärker abnimmt als die Partikelgeschwindigkeit von Wellen im Übergangsbereich.

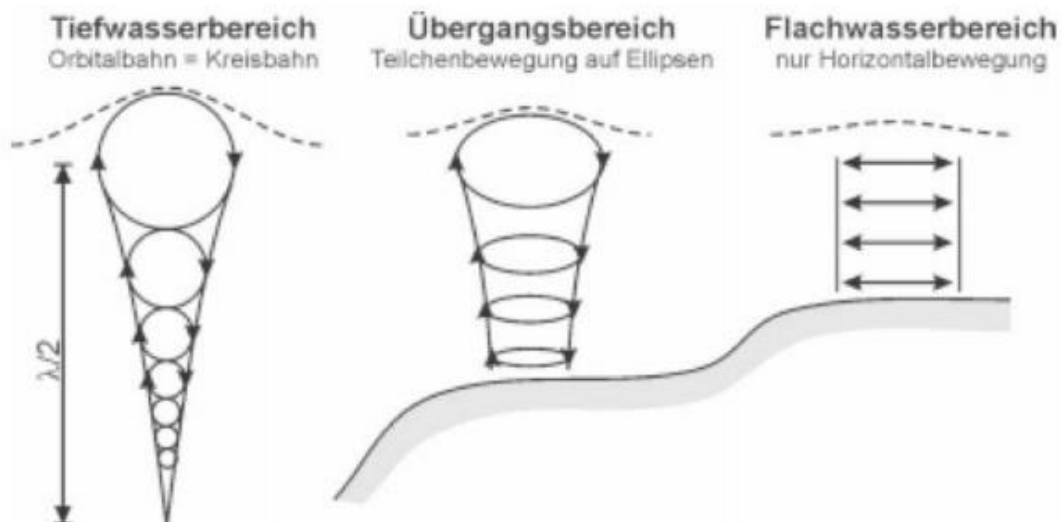


Abbildung 2: Schematische Darstellung von Tief- und Flachwasserwellen [4].

Die Kategorisierung der Wellen erfolgt über das Verhältnis von Wassertiefe zu Wellenlänge. In Tabelle 1 ist die Kategorie mit dem zugehörigen Gültigkeitsbereich dargestellt.

Tiefwasser	Mittlere Wassertiefe	Flachwasser
$\frac{d}{L} \geq 0,5$	$0,05 < \frac{d}{L} < 0,5$	$\frac{d}{L} \leq 0,05$

Tabelle 1: Wellenkategorie mit Gültigkeitsbereich.

In dieser Bachelorarbeit werden jedoch nur Tiefwasserwellen und Wellen mittlerer Wassertiefe betrachtet.

2.1.2 Wellentheorie nach Airy

Mit der Wellentheorie nach Airy können Wellen beschrieben werden, deren Amplitude klein im Vergleich zur Wellenlänge ist. Die Wellen der Wellentheorie nach Airy werden auch als lineare-Wellen oder Stokes Wellen 1. Ordnung bezeichnet. Wellen höherer Ordnung werden als Stokes Wellen 2. bis 5. Ordnung bezeichnet. Mehr zu Wellen höherer Ordnung ist in [2] zu finden.

Sich in x- Richtung ausbreitende Wellen können durch (Gleichung (2.1)) beschrieben werden.

$$\eta(x, t) = A \cdot \sin(k \cdot x - \omega \cdot t) \quad (2.1)$$

Dabei stellt $\eta(x, t)$ die Auslenkung der freien Oberfläche, A die Amplitude, k die Wellenzahl, ω die Wellenkreisfrequenz und t die Zeit dar.

Die Wellenkreisfrequenz kann über die Dispersionsrelation (Gleichung (2.2)) bestimmt werden.

$$\omega^2 = g \cdot k \cdot \tanh(k \cdot d) \quad (2.2)$$

Die Dispersionsrelation stellt einen Zusammenhang zwischen der Periodendauer (Gleichung (2.3)) und der Wellenlänge (Gleichung (2.4)) her.

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \quad (2.3)$$

$$L = 2 \cdot \frac{\pi}{k} \quad (2.4)$$

Als Dispersion wird in der Physik allgemein die Änderung von Welleneigenschaften mit den Eigenschaften des Trägermediums bezeichnet [3]. Hier entspricht das Trägermedium dem Wasser. Eine Welle hat also bei gegebener Wassertiefe und Periode nur eine Wellenlänge. Bei einer Änderung der Wassertiefe ändert sich somit auch die Wellenlänge, da die Periode konstant bleibt [3].

2.1.3 Geschwindigkeiten und Partikelbahnen

In Abbildung 3 sind die Partikelbahnen und Orbitalgeschwindigkeiten einer Tiefwasserwelle dargestellt. Es ist zu erkennen das die Orbitalgeschwindigkeit mit abnehmender Wassertiefe exponentiell abnimmt. Im Bereich des Wellenbergs erreichen die Orbitalgeschwindigkeiten ihr Maximum.

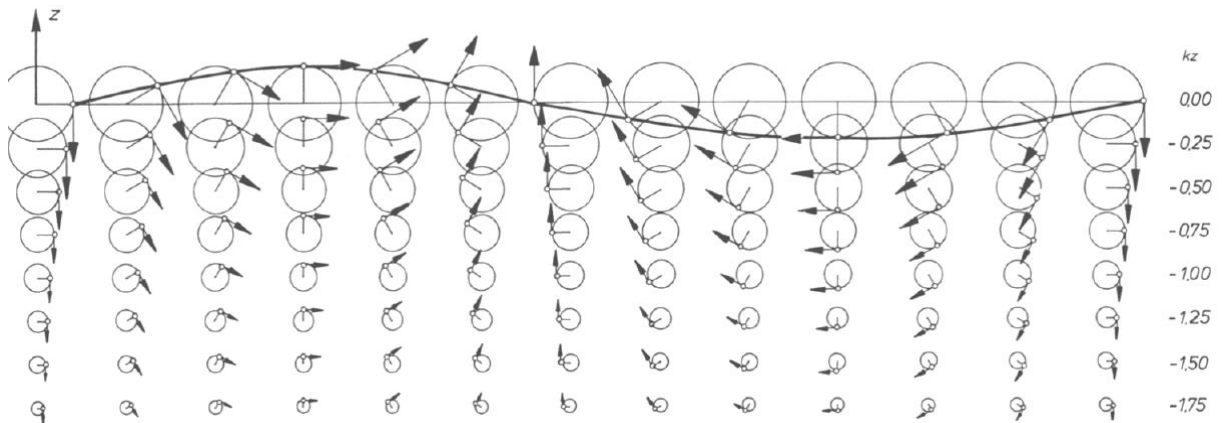


Abbildung 3: Partikelbahnen und Orbitalgeschwindigkeiten bei festen Phasenwinkel und Wassertiefen [1].

Die Orbitalgeschwindigkeiten in horizontale Richtung lassen sich über (Gleichung (2.5)) ermitteln. Die Orbitalgeschwindigkeiten in vertikale Richtung werden durch (Gleichung (2.6)) beschrieben

$$u(x, t) = A \cdot \omega \cdot \frac{\cosh(k \cdot z)}{\sinh(k \cdot d)} \sin(k \cdot x - \omega \cdot t) \quad (2.5)$$

$$w(x, t) = A \cdot \omega \cdot \frac{\sinh(k \cdot z)}{\sinh(k \cdot d)} \sin(k \cdot x - \omega \cdot t) \quad (2.6)$$

Die Phasengeschwindigkeit von Wellen lässt sich über (Gleichung (2.7)) bestimmen.

$$c = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{g}{k} \cdot \tanh(k \cdot d)} \quad (2.7)$$

In diese Gleichung (Gleichung (2.7)) geht die Dispersionsrelation (Gleichung (2.2)) ein.

Die Phasengeschwindigkeit sagt aus, mit welcher Geschwindigkeit sich eine Einzelwelle fortbewegt. Die Phasengeschwindigkeit hängt von der Wellenlänge und der Wassertiefe ab.

Wellen treten auch in sogenannten Wellengruppen auf. Wellengruppen entstehen, wenn sich zwei oder mehr Wellen überlagern. In Abbildung 4 ist die Überlagerung zweier Wellen dargestellt. Die Einzelwellen, aus der sich die in Abbildung 4 gezeigte Wellengruppe ergibt, besitzen verschiedene Frequenzen.

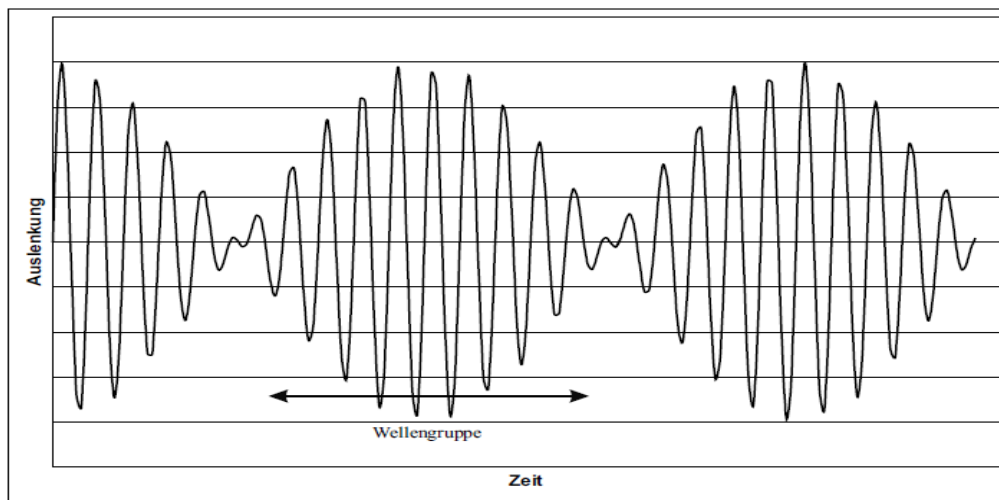


Abbildung 4: Überlagerung von zwei Wellen mit unterschiedlicher Frequenz, zu einer Wellengruppe [3].

Die Geschwindigkeit, mit der sich eine Wellengruppe in Ausbreitungsrichtung bewegt lässt sich über (Gleichung (2.8)) bestimmen.

$$c_{gr} = \frac{c}{2} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot k \cdot d}{\sinh(2 \cdot k \cdot d)} \right) \quad (2.8)$$

Dabei ist c_{gr} die Gruppengeschwindigkeit und c die Phasengeschwindigkeit.

2.1.4 Wellenenergie

Der mittlere Energiegehalt einer Welle berechnet sich über (Gleichung (2.9))

$$\bar{E}_{ges} = \bar{E}_{pot} + \bar{E}_{kin} = \frac{1}{8} \rho \cdot g \cdot H^2 \quad (2.9)$$

Dabei ist \bar{E}_{ges} der mittlere Energiegehalt pro Flächeneinheit.

Der mittlere Wellenenergiegehalt nimmt also mit dem Quadrat der Wellenhöhe zu.

Die Energie der Welle bewegt sich senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle mit der Gruppengeschwindigkeit [14]. Dies wird als Energiefluss bezeichnet. Der mittlere Energiefluss wird durch eine Multiplikation von Wellenenergie und Gruppengeschwindigkeit (Gleichung (2.8)) erhalten.

$$\dot{E} = \frac{1}{8} \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot \frac{c}{2} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot k \cdot d}{\sinh(2 \cdot k \cdot d)} \right) \quad (2.10)$$

Dabei ist \dot{E} der Energiefluss.

2.1.5 Reflexion von Wasserwellen

Reflexion von Wasserwellen entstehen, wenn eine fortlaufende Welle auf ein Hindernis trifft. An dem Hindernis werden die Wellen reflektiert, dabei ist häufig die Wellenhöhe der reflektierten Welle geringer. Die Wellenhöhe der reflektierten Welle ist geringer, da beim Auftreffen auf ein Hindernis Energie dissipiert wird. Wellen können zusätzlich auch mit einer anderen als der ursprünglichen Frequenz reflektiert werden.

Durch Addition der reflektierten und der eintretenden Welle kann, die sich bei Überlagerung ergebende Wellengruppe bestimmt werden. Dies wird durch (Gleichung (2.11)) beschrieben.

$$\eta(x, t)_{komb} = \frac{H_{Ein}}{2} \cdot \cos(k_{ein} \cdot x - \omega_{ein} \cdot t) + \frac{H_R}{2} \cdot \cos(k_R \cdot x - \omega_R \cdot t) \quad (2.11)$$

Dabei steht der Index *Ein* für die eintretende und der Index *R* für die reflektierte Welle. Der Index *Komb* steht für die kombinierten Wellen.

Wenn die Wellenhöhen der eintretenden und der reflektierten Welle unterschiedlich sind, ergibt sich bei gleicher Frequenz von eintretender und reflektierter Welle eine sinusförmige Welle. Bei konstruktiver Interferenz ist die Wellenhöhe der kombinierten Welle größer als die der eintretenden Welle. Bei destruktiver Interferenz ist die Wellenhöhe der Kombinierten Welle kleiner als die der Eintretenden Welle. Bei Überlagerung von Wellen mit unterschiedlicher Frequenz ergibt sich eine Welle mit unterschiedlichen Amplituden ähnlich (Abbildung 4).

Die Stärke der Reflexion von Wasserwellen kann mit dem Reflexionskoeffizienten bestimmt werden. Der Reflexionskoeffizient wird aus dem Quotienten der reflektierten Welle und der eintretenden Welle nach (Gleichung (2.12)) bestimmt.

$$K_R = \frac{H_R}{H_{Ein}} \quad (2.12)$$

Dabei ist K_R der Reflexionskoeffizient.

2.2 Funktionsprinzipien der einzelnen Wellenabsorber

In dieser Bachelorarbeit werden ausschließlich passive Absorber untersucht. Passive Wellenabsorber dämpfen die eintretenden Wellen ausschließlich durch ihre Geometrie. Es sind keine bewegten Komponenten vorhanden. In diesem Kapitel werden einige der grundlegenden Wirkmechanismen der zu untersuchenden Wellenabsorber dargestellt.

2.2.1 Shoaling und Wellenbrechen

Durch die Dispersionsrelation ist ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Periodendauer und Wellenlänge vorgegeben. Beim Shoaling nimmt die Wassertiefe jedoch fortlaufend ab. Dadurch ändern sich auch die Eigenschaften der Welle. Es ändern sich bei Veränderung der

Wassertiefe: Die Wellenlänge bzw. die Wellenzahl und die Wellenhöhe sowie durch Bodenreibung die Wellenenergie [3].

Die Wellenlänge nimmt wie in Abbildung 5 dargestellt bei steigender Sohlhöhe kontinuierlich ab. Außerdem ist zu sehen, dass Wellen die Sohle eher spüren je länger sie sind. Bei einer 20m langen Welle nimmt die Wellenlänge bereits bei einer Sohlhöhe von ca. 8m ab. Die 1m lange Welle verringert erst ab einer Wassertiefe von ca. 40cm ihre Wellenlänge [3].

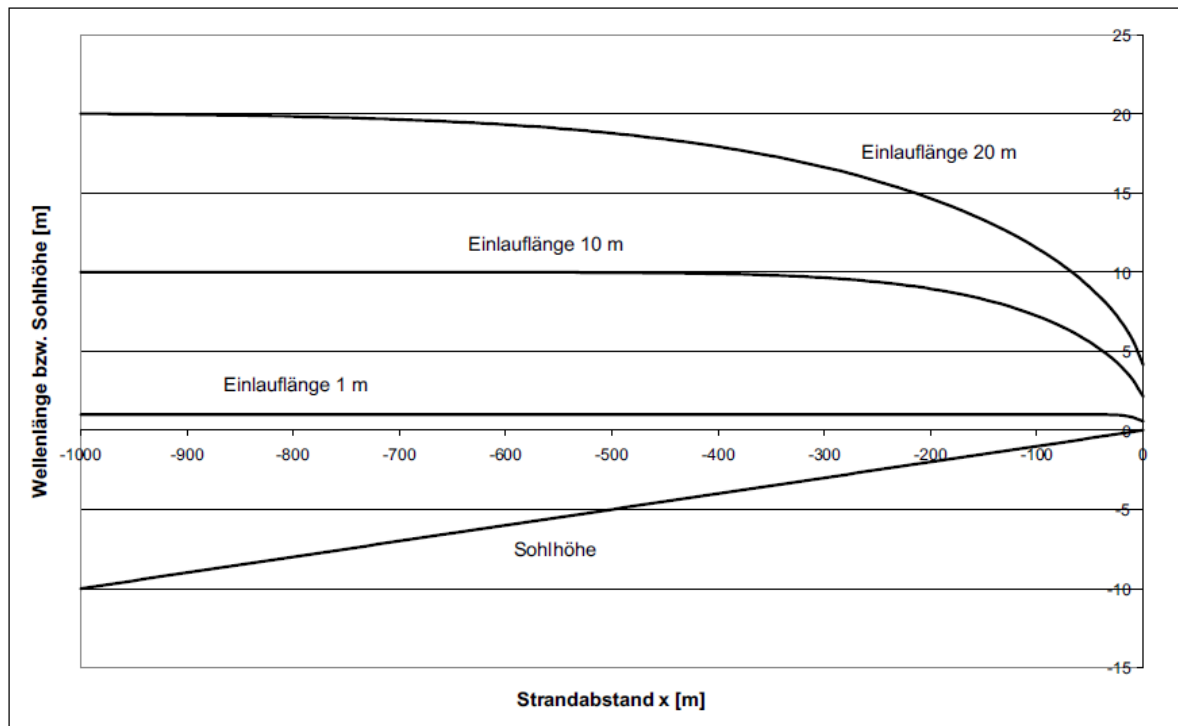


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen Sohlhöhe und Wellenlänge bei abnehmendem Strandabstand [3].

Die Änderung der Wellenamplitude beim Shoaling ist in Abbildung 6 dargestellt. Es ist zu sehen das eine aus dem Tiefwasser kommende Welle zu Beginn an Wellenhöhe verliert. In diesem Punkt nimmt die Gruppengeschwindigkeit zu, weshalb die Wellenhöhe abnimmt. Bei weiterer Reduzierung der Wassertiefe nimmt die Wellenhöhe zu. Die Phasen- und Gruppengeschwindigkeit nehmen im flachen Wasser ab, dadurch nimmt auch die Wellenlänge ab. Die Wellenlänge nimmt zusätzlich durch Reibung zwischen Welle und Boden ab.

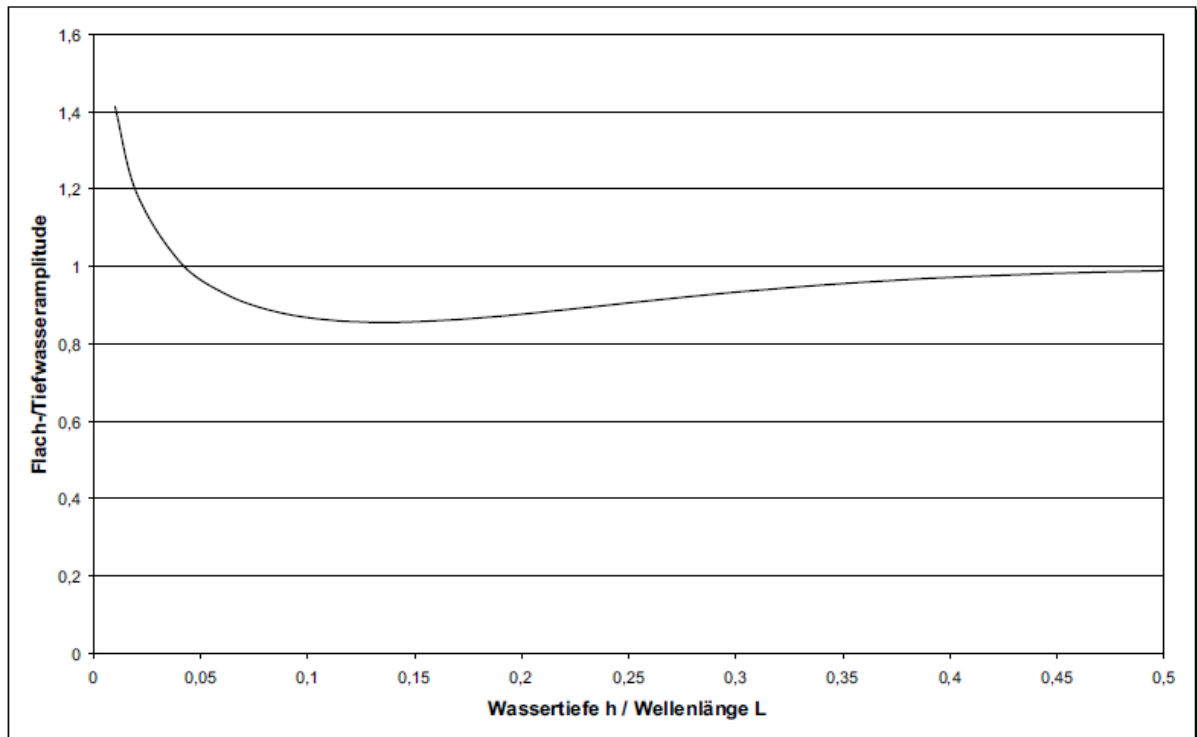


Abbildung 6: Abnehmende Tiefwasseramplitude einer aus dem Tiefwasser auf einen Strand auflaufenden Welle infolge des Shoaling – Effektes [3].

Durch die Kombination von abnehmender Wellenlänge und zunehmender Wellenhöhe nimmt die Wellensteilheit zu. Sobald die Wellensteilheit einen kritischen Wert erreicht bricht die Welle. Beim Brechen der Welle wird ihre Energie zum Teil in turbulente kinetische Energie umgewandelt [3]. Durch Sohlreibung wird während des Shoalings zusätzliche Energie dissipiert. Des Weiteren hat die Sohlreibung mit abnehmender Wassertiefe eine immer größere Wirkung auf die Welleneigenschaften. Durch die Sohlreibung verlieren Wellen in Abhängigkeit von ihrer Frequenz, bei Sohlkontakt an Energie. Je größer die Frequenz der Welle desto stärker ist die Wirkung der Sohlreibung [3].

Die Wellensteilheit (S) (Gleichung (2.13)) beschreibt das Verhältnis von Wellenhöhe zu Wellenlänge.

$$S = \frac{H}{L} \quad (2.13)$$

Die Grenzsteilheit bei der Tiefwasserwellen brechen liegt bei $S = 0,143$. Die Wellen brechen, weil die Geschwindigkeit im Wellenberg viel größer wird als die Geschwindigkeit im Wellental [3]. Eine große Steilheit besitzen Wellen in Ihrem Entstehungsstadium, oder kurz vor dem Brechen [3].

Allgemein kann die Grenzsteilheit über (Gleichung (2.14)) bestimmt werden.

$$S_{Grenz} = \left(\frac{H}{L}\right)_{\text{maximal}} = \frac{1}{7} \cdot \tanh\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{d}{L}\right) \quad (2.14)$$

Das Brechen der Wellen lässt sich in mehrere Brecherformen unterteilen. Die Unterteilung erfolgt über die Iribarren-Zahl (Gleichung (2.15)):

$$\zeta_0 = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \quad (2.15)$$

Wobei der Index 0 sich auf die Welleneigenschaften im Tiefwasser bezieht, α ist der Neigungswinkel und ζ_0 die Iribarren-Zahl.

Es wird grundsätzlich zwischen drei Brecherformen unterschieden. In Tabelle 2 sind die Brecherformen mit ihrer zugehörigen Iribarren-Zahl dargestellt.

Schwallbrecher	Sturzbrecher	Partieller Sturzbrecher/ Reflexionsbrecher
$\zeta_0 < 0,5$	$0,5 < \zeta_0 < 3,3$	$\zeta_0 > 3,3$

Tabelle 2: Brecherform mit zugehöriger Iribarren-Zahl (für Welleneigenschaften im Tiefwasser).

Schwallbrecher treten bei Stränden mit einer sehr geringen Steigung auf. Die Wellen brechen sanft und mit geringer Reflexion. Sturzbrecher (Abbildung 7) entstehen an Stränden mit geringer bis moderater Steigung. Die Wellen brechen schlagartig und unter Ausbildung eines Überhanges. Die Reflexion ist gering. Bei Stränden mit großer Steigung entstehen partielle Sturzbrecher (auch Reflexionsbrecher genannt). Die Welle gleite den Strand hinauf, dabei wird ihre Energie nicht vollständig dissipiert. Diese Brecherform hat die größte Reflexion zu Folge. Es lässt sich allgemein sagen: Je höher die Iribarren-Zahl desto größer ist der Reflexionskoeffizient.

Der Punkt, an dem die Wellen brechen, wird als Brecherlinie bezeichnet. Nach dem die Wellen gebrochen ist, gleitet eine Restwelle weiter den Strand hinauf. Die Strecke, welche die Restwelle zurücklegt, wird als Auflaufbereich bezeichnet [3]. Der Teil des Strandabsorbers, welcher sich oberhalb der Wasseroberfläche befindet, wird als Freibord bezeichnet.

Sturzbrecher (plunging breaker)

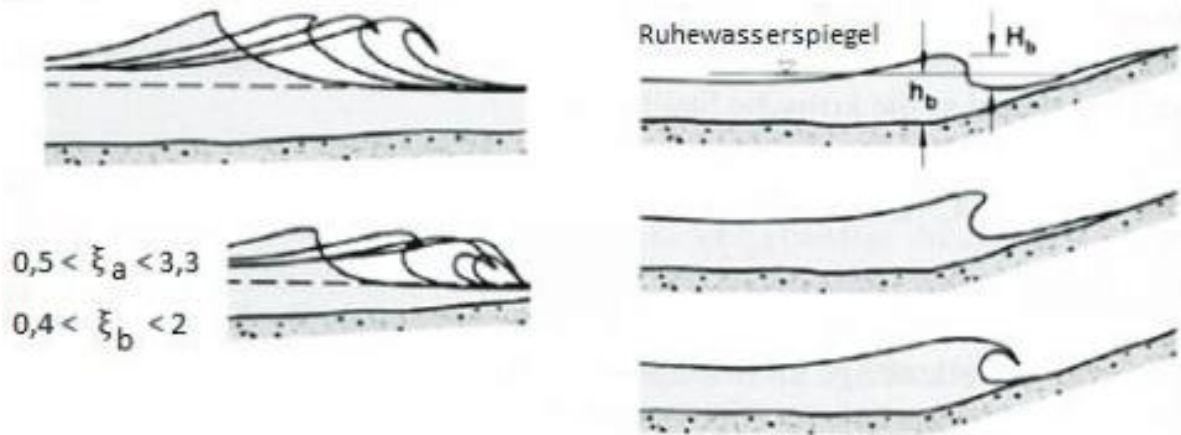


Abbildung 7: Schematische Darstellung eines Sturzbrechers mit Irbarren-Zahl (ζ_a) bzw. (ζ_0) (für Welleneigenschaften im Tiefwasser) und (ζ_b) (Welleneigenschaften beim brechen) [7].

2.2.2 Diffraktion

Die Diffraktion von Wellen an einem Spalt der schmäler als eine Wellenlänge ist wird im Folgenden erklärt.

In Abbildung 8 ist der Ablauf der Diffraktion, sich normal auf ein Hindernis zubewegenden Wellen, schematisch dargestellt. Die Wellen schwenken nach passieren eines Hindernisses in den Wellenschatten ein.

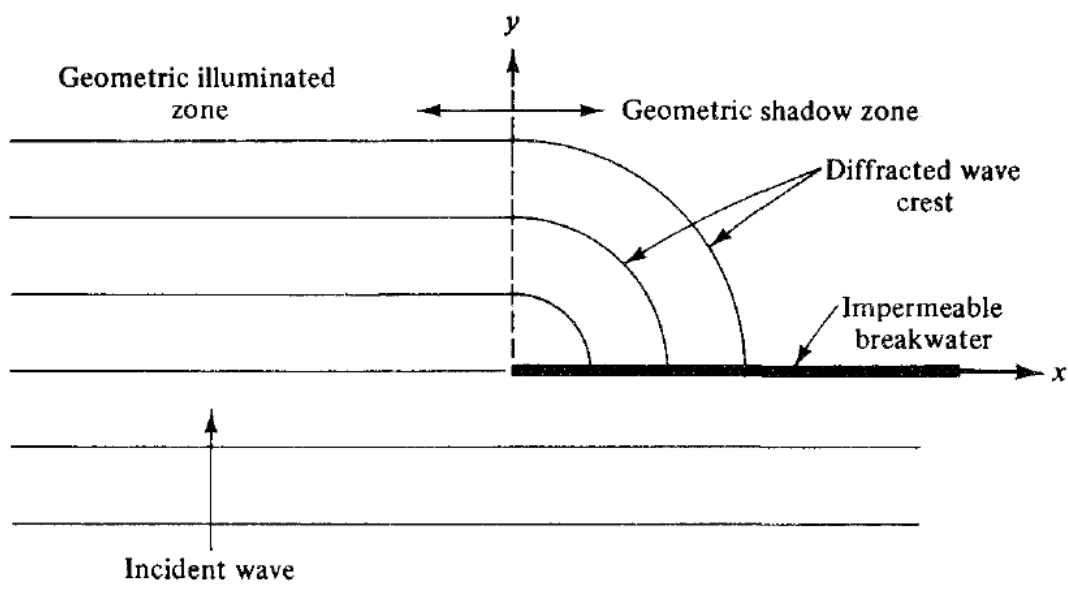


Abbildung 8: Diffraktion einer auf ein Hindernis zulaufenden Welle [2].

Die Wellenhöhe hinter dem Hindernis nimmt mit Abstand zum Hindernis ab. Wellen, die auf eine Öffnung treffen werden, zum Teil transmittiert und zum anderen Teil reflektiert. Der Teil,

der auf die Öffnung trifft, wird hindurchgelassen. Auch Transmission genannt. Der Teil der Wellen, welcher auf die Umrandung der Öffnung trifft, wird reflektiert.

Wenn die Öffnung kleiner als die Wellenlänge ist, entstehen Kugelwellen. Diese Wellen überlagern sich. Durch die Überlagerung bildet sich ein Interferenzmuster aus, welches aus Bereichen konstruktiver und destruktiver Interferenz besteht. In Abbildung 9 ist dieser Vorgang schematisch dargestellt.

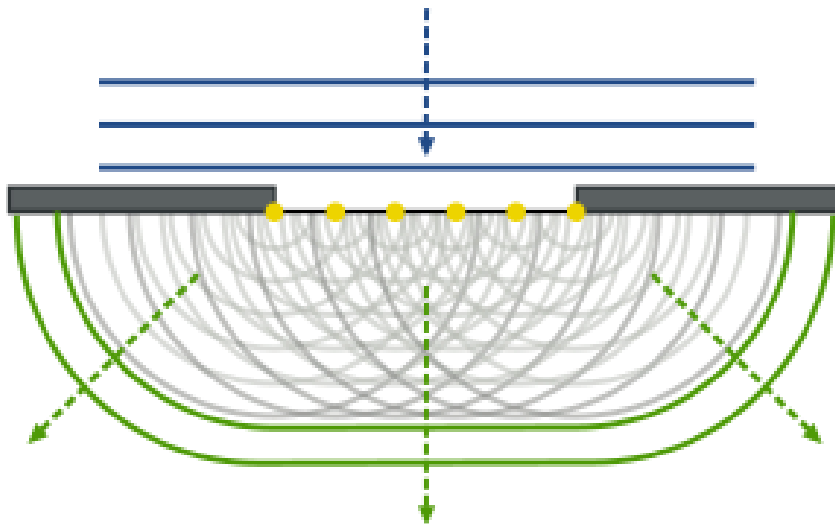


Abbildung 9: Ausbildung eines Interferenzmusters infolge der Diffraction von Wasserwellen an Öffnungen, welche schmäler als die Wellenlänge sind [6].

2.3 Grundlagen der numerische Strömungsmechanik

Im in diesem Kapitel werden Gleichungen aufgeführt, welche während der Simulation gelöst werden. Der genutzte Solver löst die Navier-Stokes-Gleichung für zwei inkompressible, isotherme, nicht mischbare Fluide. Es werden die Kontinuitätsgleichung, die Navier-Stokes-Gleichung und die Mehrphasenströmung grundlegend erläutert. Auf Herleitungen wird verzichtet.

Für ausführliche Herleitungen zu der Kontinuitäts- und Navier-Stokes-Gleichung sei auf [11] verwiesen.

2.3.1 Kontinuitätsgleichung

Die Kontinuitätsgleichung besagt, dass die Masse im System erhalten bleibt. Die zeitliche Änderung der Masse in einem Kontrollvolumen entspricht der Differenz der Summen der über die Systemgrenzen ein und austretenden Massenströme.

Die allgemeine Kontinuitätsgleichung für den dreidimensionalen Fall (Gleichung (2.16)) lautet:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} = 0 \quad (2.16)$$

Dabei ist ρ die Dichte und u, v, w sind die Geschwindigkeitskomponenten in x, y und z Richtung.

Für ein inkompressibles Fluid verschwindet die Zeitabhängigkeit, da die Dichte über der Zeit konstant bleibt. Damit geht (Gleichung (2.16)) über in (Gleichung (2.17)).

$$\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} = 0 \quad (2.17)$$

2.3.2 Navier-Stokes-Gleichung für inkompressible Fluide

Die Navier-Stokes-Gleichung sagt aus, dass die zeitliche Änderung des Impulses innerhalb eines Volumenelements der Summe der eintretenden Impulsströme minus der Summe der austretenden Impulsströme plus die Summe der wirkenden Oberflächenkräfte der Volumenkräfte entspricht. Für inkompressible Fluide kann die Navier-Stokes-Gleichung wie folgt dargestellt werden.

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \cdot \vec{v} \right) = \vec{f} - \nabla p + \mu \cdot \Delta \vec{v} \quad (2.18)$$

Dabei ist ρ die Dichte, \vec{v} der Geschwindigkeitsvektor, \vec{f} eine Volumenkraft, p der Druck und μ die dynamische Viskosität.

Über die Impulsgleichung sind das Druck- und Geschwindigkeitsfeld gekoppelt. Die Impulsgleichung ist zudem nichtlinear.

2.3.3 Mehrphasenströmung

Bei der Simulation von Wasserwellen handelt es sich um eine Mehrphasenströmung von zwei nicht miteinander mischbaren, inkompressiblen Fluiden. Häufig wird auch die Luft als inkompressibel betrachtet, so dass beide Fluide inkompressibel sind.

Die hier verwendete Methode ist die VOF-Methode (Volume Of Fluid). Das Hauptprinzip liegt darin, dass der Füllgrad (α) der Zellen des CFD-Netzes bestimmt wird. Ist der Füllgrad eins, dann ist die Berechnungszelle komplett mit Fluid eins gefüllt, wenn der Füllgrad null ist, dann ist die Zelle komplett mit Fluid zwei gefüllt. Der Füllgrad kann jedoch auch zwischen null und eins liegen, dies bedeutet, dass die Zelle zu einem Teil mit Fluid eins und zum restlichen Teil mit Fluid zwei gefüllt ist. Dies ist schematisch in Abbildung 10 dargestellt. Zur Bestimmung des Zellfüllgrades (α) muss eine zusätzliche Transportgleichung (Gleichung (2.19)) gelöst werden.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\gamma \cdot w)}{\partial z} = 0 \quad (2.19)$$

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.07	0	0	0	0	0	0	0	0
0.91	0.76	0.57	0.48	0.27	0.12	0.02	0	0
1	1	1	1	1	1	0.94	0.89	0.78
1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1

Abbildung 10: Schematische Darstellung des Zellfüllgrads (α) ($0 \leq \alpha \leq 1$) [12].

2.4 Versuchsplanung

In der Versuchsplanung geht es um Methodiken zur Planung und statistischen Auswertung von Versuchen. Das Ziel ist es mit möglichst wenig Aufwand viel über die Zusammenhänge von Einflussvariablen auf Zielgrößen zu erhalten.

Bei der Versuchsplanung können eine Vielzahl von Methoden angewendet werden.

Einige Beispiele wären die „Versuch und Irrtum Methode“, bei der mehrere Einflussvariablen zur selben Zeit verändert werden. Dadurch kann aber nur noch schlecht Rückschluss getroffen werden, welche Einflussvariable Einfluss auf die Zielgröße hat. Außerdem kann ein Optimum nur durch Zufall gefunden werden.

Eine weitere Methode ist die Vollfaktorielle Versuchsplanung. Bei dieser Methode werden alle möglichen Einstellkombinationen durchlaufen. Diese Methode ist sehr zeitaufwändig, führt aber zu einem guten Ergebnis.

Bei der Einfaktor-Methode, welche in dieser Bachelorarbeit verwendet wird, wird immer nur eine Einflussvariable zurzeit geändert. Das optimale Ergebnis dieser Teilvariation wird dann für die nachfolgenden Optimierungen beibehalten. Das Vorgehen bei Anwendung der Einfaktor-Methode ist in Abbildung 11 dargestellt. X_1 und X_2 sind die Einflussgrößen, dies können in Bezug auf den Absorber z.B. der Neigungswinkel und die Länge der Platte sein.

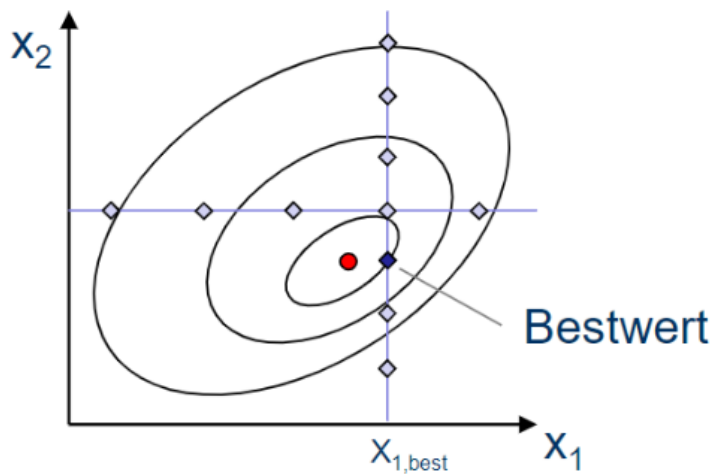


Abbildung 11: Prinzip der Einfaktor-Methode mit zwei Einflussgrößen (x_1 und x_2) [13].

Die Einfaktor-Methode ist damit wesentlich weniger zeitintensiv als z.B. die vollfaktorielle Versuchsplanung.

Die Nachteile der Einfaktor-Methode sind zum einen, dass Wechselwirkungen nicht erkannt werden. Zum anderen kann es dazu kommen, dass das Optimum nicht erreicht wird, da das Ergebnis von dem Startwert abhängt. Die Einfaktor-Methode wird trotz allem für die Erstellung der Simulationsfälle verwendet, da bei einer großen Anzahl von Einflussgrößen der Aufwand mit anderen Methoden der Versuchsplanung zu zeitintensiv ist. Es wäre noch möglich gewesen, höherwertige, aber auch komplexe Methoden des Design of Experiments (DoE) zu verwenden, um aussagekräftige Ergebnisse mit überschaubarem Aufwand zu erzielen. Aufgrund der begrenzten Zeit wurde darauf jedoch verzichtet. Des Weiteren können mittels der CFD-Simulation Einflussgrößen trotz Anwendung der Einfaktor-Methode getrennt voneinander untersucht werden, da z.B. die Öffnungen oder die Aufrauung der Platten-Oberfläche zu- oder abgeschaltet werden können.

3 Simulation

Die Simulationen werden mit OpenFOAM in der Version v1906 durchgeführt. OpenFOAM ist ein kostenloses, frei zugängliches Simulationssoftwarepaket für kontinuumsmechanische Fragestellungen. Das Hauptanwendungsgebiet liegt im Bereich der numerischen Strömungsmechanik (CFD). OpenFOAM ist in C++ geschrieben und skriptbasiert. Es gibt keine grafische Benutzeroberfläche. Es können aber verschiedene Dienstprogramme genutzt werden, welche eine grafische Benutzeroberfläche bieten. Als Postprozessor für die grafische Aufbereitung der Ergebnisse wird das Dienstprogramm ParaView verwendet.

Der reale Wellenkanal an der HAW wird mit einem numerischen Modell nachgebildet. Die Abmaße des realen Wellenkanals betragen (L x H x B) (10m x 1,5m x 1m). Der nachgebildete Wellenkanal ist kleiner (5m x 1,25m x 0.5m) als der reale, dadurch wird die Berechnungsdauer reduziert. Der Wellenkanal ist aufgrund von einer Symmetrierandbedingung an der Mittelebene schmaler als der reale Wellenkanal. Eine Verkürzung des numerischen Wellenkanals ist möglich, da die Interaktion zwischen Welle und Absorber im hinteren Teil des Kanals stattfindet.

Die Geometrien der verschiedenen Absorbervarianten werden als STL-Dateien in OpenFOAM importiert. Die Platte mit Öffnungen, Waben und Halbschalen ist in Abbildung 12 zu sehen. Es können alle Variationen einzeln hinzu geschaltet werden.

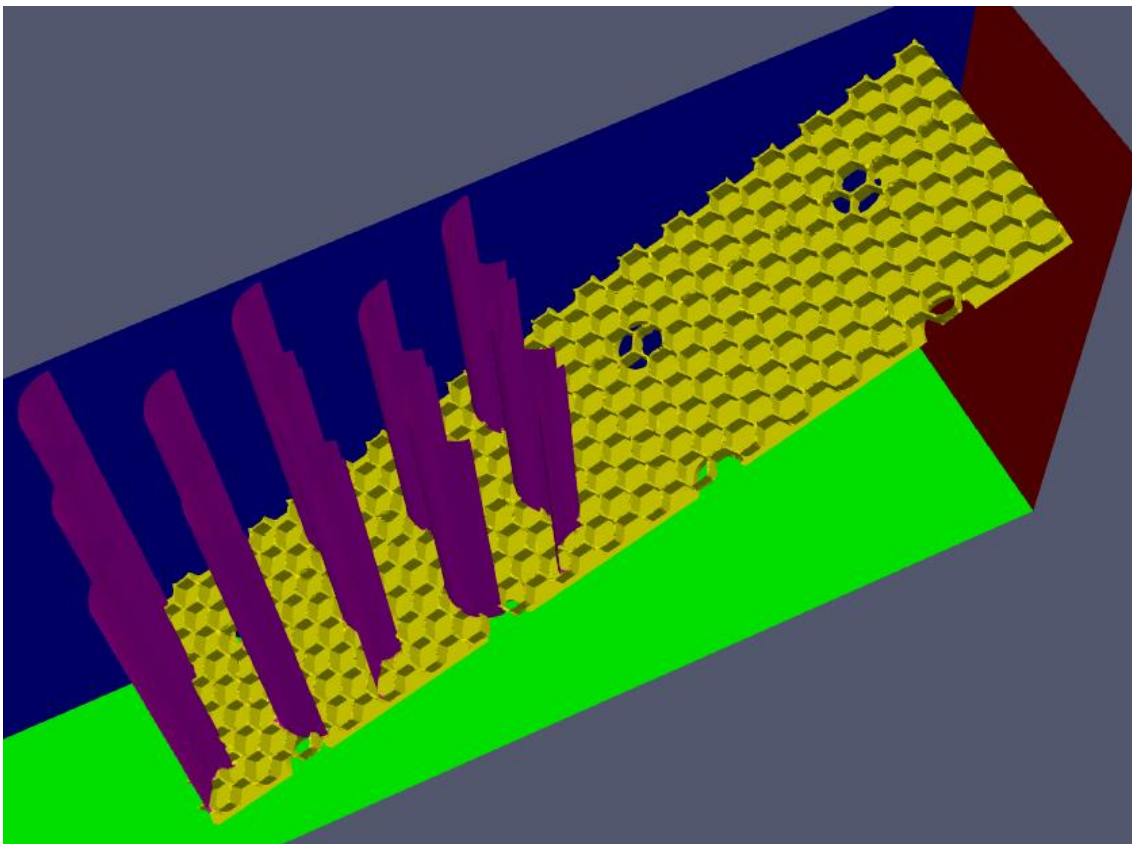


Abbildung 12: Berechnungsgebiet mit Aktivierung aller Absorbervarianten: Platte, Platte mit Öffnungen/ Aufrauung und Halbschalenstrukturen.

3.1 Netzgenerierung

Für die Vernetzung werden die OpenFOAM-Werkzeuge blockMesh und snappyHexMesh verwendet.

Die grundsätzliche Vernetzung und Geometrieerzeugung des eigentlichen Wellenkanals erfolgt mit dem blockMesh Werkzeug. Das Grundnetz ist hierbei ein rein kartesisches Gitter. Das mit dem blockMesh erstellte Netz wird mit dem snappyHexMesh Werkzeug verfeinert.

Die gebietsweisen Verfeinerungen liegen im Bereich der freien Oberfläche (1), vor dem Wellenabsorber (2) und im Gebiet des Wellenabsorbers (3). Die Wasserspiegelauslenkung ist das wichtigste Kriterium für die Bewertung der Absorbertypen, daher wird dieses Gebiet verfeinert. Außerdem muss das Gebiet der freien Oberfläche verfeinert werden, damit die Auflösung der Grenzfläche zwischen den beiden Phasen Luft und Wasser möglichst gut gelingt. Im Bereich des Absorbers sind Netzverfeinerungen notwendig, da durch strömungsmechanische Einflüsse die Geschwindigkeit des Fluids ansteigen kann. Außerdem ist zur Bewertung der Absorber die Interaktion zwischen Wellen und Absorber ein wichtiges Kriterium. Das generierte Netz ist in Abbildung 13 dargestellt.

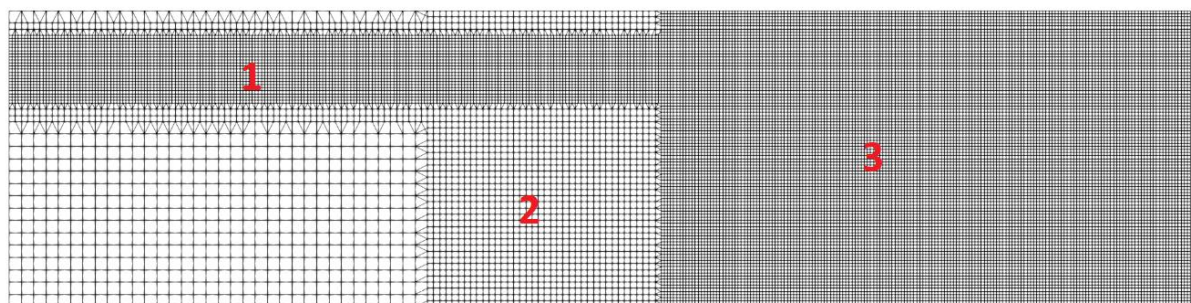


Abbildung 13: Netz mit gebietsweisen Verfeinerungen im Bereich der freien Oberfläche (1), kurz vor dem Gebiet des Absorbers (2) und im Gebiet des Absorbers (3).

Die Verfeinerung im Bereich der freien Oberfläche ist etwas höher als die Wellenhöhe. Dadurch wird eine Vergrößerung der Wellenhöhe aufgrund von konstruktiver Interferenz berücksichtigt. Die Wellenhöhe kann bei Überlagerung maximal der doppelten Wellenhöhe der einlaufenden Welle entsprechen. Die Verfeinerung im Bereich des Absorbers (3) wird in jedem Berechnungsfall an die Abmaße des Absorbers angepasst. Der Absorber soll in keinem Fall aus dem Bereich (3) des verfeinerten Netzes ragen, damit eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Einstellungen gewährleistet ist.

Neben der gebietsweisen Anpassung des Netzes gibt es noch die bauteilbezogene Anpassung des Netzes. Die bauteilbezogene Netzanpassung erfolgt wie die gebietsweise Netzanpassung mit dem snappyHexMesh Werkzeug. Die bauteilbezogene Netzanpassung erfolgt ausgehend vom Grundnetz in vier Schritten. Im ersten Schritt werden die Zellen, welche sich im Bereich der Kontur des Bauteils befinden, in kleinere Zellen aufgeteilt. Als nächstes beginnt der Schritt der Zellentfernung. Dabei werden nur Zellen beibehalten, die zu ungefähr 50% ihres Volumens im Bauteilgebiet liegen. Durch die Entfernung der Zellen stimmt das erstellte Netz nicht mit der Kontur des Bauteils überein. Daher wird im snapping-Prozess das

Netz an die Kontur angepasst. Im letzten Schritt wird die Kontur der Bauteile schichtweise verfeinert.

3.2 Randbedingungen

Um das Verhalten von Wellen in dem Wellenkanal zu simulieren, müssen angemessene Randbedingungen gewählt werden. Der Wellenkanal besitzt sechs Ränder: Inlet, Outlet, Ground, Top, Side, Symmetry. Abbildung 14 zeigt das Berechnungsgebiet mit dem Koordinatensystem und mit den genannten Rändern, nur der Symmetrierand ist zur Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Am Inlet wird die Welle erzeugt. Die Inlet-Randbedingung ist mit den Welleneigenschaften verbunden. Es können die Wellenhöhe, Periode und Art der Welle (hier Airy-Welle) angegeben werden. Am Outlet kann eingestellt werden, ob die Wellen frei auslaufen können oder von der Rückwand reflektiert werden. Das Auslaufen der Wellen wird dabei durch ein sogenanntes „Shallow Water Absorption“-Modell und eine Geschwindigkeitsrandbedingung am Outlet nachgebildet. Der Boden und die Seitenwände sind als Wall abgebildet, für sie gilt die Haftbedingung. An der Mittelebene des Wellenkanals wird eine Symmetrie-Randbedingung angewendet, dadurch kann das Berechnungsgebiet verkleinert und damit die Berechnungsdauer verringert werden. Die obere Begrenzung des Wellenkanals besitzt eine Randbedingung, durch die Wasser aus dem Berechnungsgebiet austreten, aber nicht von außen nachströmen kann. Luft kann hingegen aus und einströmen.

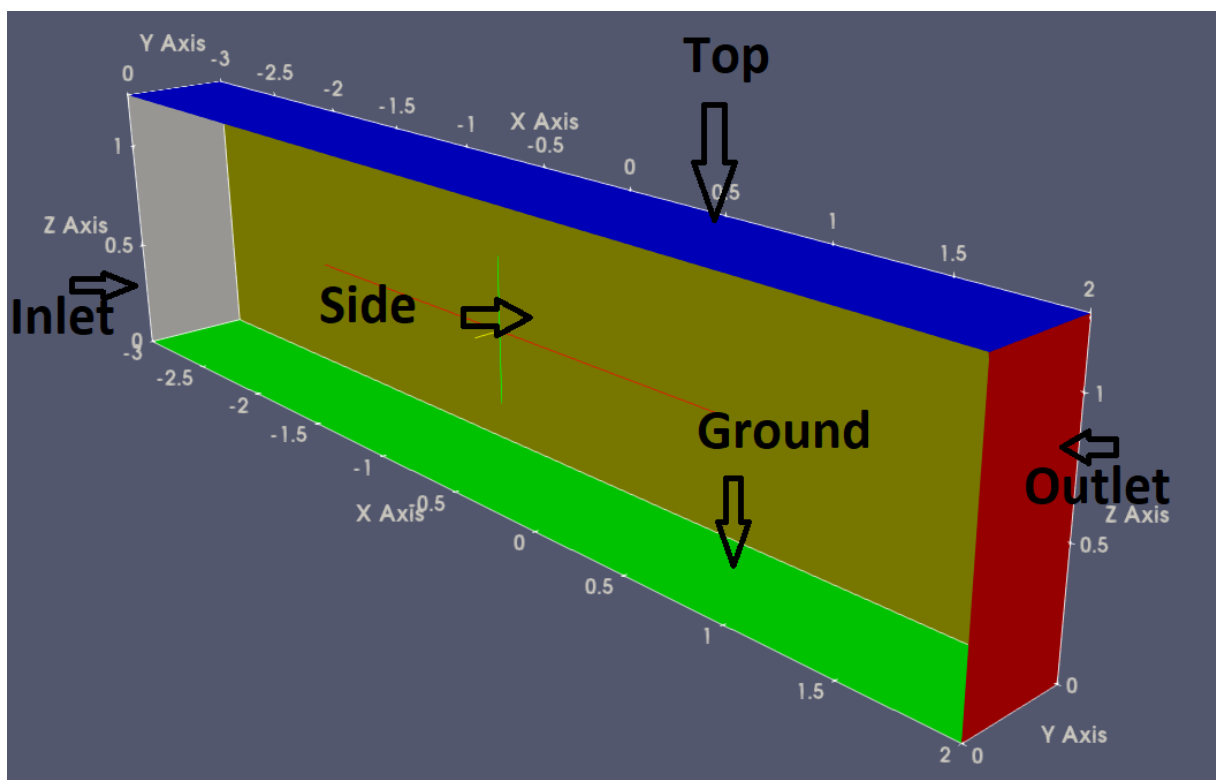


Abbildung 14: Berechnungsgebiet mit Rändern und Koordinatensystem. Die offene Seite ist der Symmetrierand.

3.3 Input Daten

Mit dem CFD-Modell sollen die in Tabelle 3 dargestellten Betriebsarten simuliert werden.

Betriebsart	Füllstand d in m	Wellenlänge L in m	Wellenhöhe h in m	Periode T in s	d/L	Kategorie
B 1	0,5	2	0,2	1,18	0,25	Mittlere Wassertiefe
B 2	1	2	0,2	1,13	0,5	Tiefwasser
B 3	0,5	1	0,15	0,8	0,5	Tiefwasser
B 4	1	1	0,15	0,8	1	Tiefwasser

Tabelle 3: Betriebsarten: B1, B2, B3, B4 mit den jeweiligen Welleneigenschaften und kategorischen Zugehörigkeiten.

Die zu simulierenden Wellen liegen gemäß dem Verhältnis von Wellenhöhe zu Wellenlänge im Bereich der Stokes Wellen dritter und vierter Ordnung (siehe [2]). Bei der hier durchgeführten relativen Betrachtung der einzelnen Wirkprinzipien der Absorbervarianten wird davon ausgegangen, dass die Airy-Wellentheorie (1. Ordnung Stokes) ausreichend ist. Betriebsart B2, B3 und B4 liegen im Bereich der Tiefwasserwellen und Betriebsart B1 im Bereich der Wellen mittlerer Wassertiefe. Die Partikelgeschwindigkeit der Betriebsart B1 nimmt also nicht über die Wassertiefe auf null ab wie bei den anderen Betriebsarten. Die Wellen der Betriebsarten B3 und B4 besitzen eine Steilheit, welche leicht über der Grenzsteilheit liegt.

3.4 Nachbildung der Welleneigenschaften

Um die Absorbervarianten in Bezug auf ihre Dämpfungseigenschaften bewerten zu können, ist es nötig, dass die Wellen möglichst genau nachgebildet werden. In Abbildung 15 ist eine Welle der Betriebsart B2 dargestellt. Die Wasserspiegelauslenkung ist 1m entfernt von dem Welleneinlass gemessen. Zur Validierung des numerischen Modells wird am Outlet die Randbedingung, welche ein freies Auslaufen der Wellen ermöglichen soll, aktiviert. Es zeigt sich jedoch, dass die Wellen im Vergleich zu ihrem idealen Verlauf höhere und spitzere Wellenberge besitzen. Die Wellentäler sind kleiner und abgeflachter als bei der idealen Wellenform. Dies sind jedoch vermutlich Einlaufeffekte. Das würde auch mit der Theorie zusammenpassen, da Wellen in ihrem Entstehungsstadium eine große Steilheit besitzen [3]. Die Periodendauer, Phasengeschwindigkeit und Wellenlänge stimmen mit der Theorie überein.

Die Prüfung der Wellenlänge und Periodendauer wird mit einem von Warnecke entwickelten Programm durchgeführt, welches leicht modifiziert wurde (siehe Kapitel 4). In [9] ist erläutert wie die Berechnung der Wellenlänge und Periodendauer durchgeführt wird. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt. Dabei ist *vgl.L* das Verhältnis der gemessenen Wellenlänge zu der idealen Wellenlänge und *vgl.T* das Verhältnis der gemessenen Periodendauer zu der idealen Periodendauer. Die Periodendauer und die Wellenlänge werden also gut nachgebildet.

Bei den Ergebnissen ist zu beachten, dass durch das verwendete Programm Abweichungen auftreten, welche die Ergebnisse verschlechtern können. Die Berechnung der Periodendauer nach [4] erfolgt auf Basis der Messwerte. Es ist jedoch nicht gegeben, dass die verwendeten Messpunkte genau gegenüber voneinander auf einer Geraden liegen. Dadurch kann es dazu kommen das für die Berechnung der Periodendauer kleinere oder größere Werte ermittelt werden, je nachdem wie weit die beiden Messpunkte zeitlich auseinander liegen. Die Wellenlänge wird aus der Periodendauer bestimmt.

Betriebsart	Vgl.L	Vgl.T
B1	1,17	1,03
B2	1,15	1,07
B3	1,11	1,05
B4	1,13	1,06

Tabelle 4: Welleneigenschaften: Betriebsarten B1, B2, B3 und B4 1m hinter dem Einlass gemessen.

Auffällig in Abbildung 15 ist jedoch, dass die Amplitude mit der Zeit abnimmt, obwohl am Outlet die Randbedingung so eingestellt ist, dass die Wellen frei auslaufen sollten. Wenn die Amplitude der Wellen im Modell mit der Zeit abnimmt, könnten diese leichter durch einen Absorber gedämpft werden. Dadurch wären die Ergebnisse verfälscht. Es wäre nicht möglich, einen Bezug zwischen den Welleneigenschaften und dem Dämpfungsvermögen der Absorbervarianten herzustellen. Vermutlich ist das „Shallow Water Absorption“-Modell, welches an der Rückwand als Randbedingung eingestellt ist, nicht geeignet, um ein ungehindertes Auslaufen der Wellen zu ermöglichen. Es sieht so aus, als wenn Reflexionen auftreten, durch welche die Amplitude aufgrund von destruktiver Interferenz abnimmt. Die Abnahme der Amplitude tritt ungefähr nach neun Sekunden auf, nach dieser Zeit ist die erste erzeugte Welle einmal bis zum Ende des Kanals und wieder, bis zu Position der Messstelle zurückgelaufen (Gleichung (2.8)). Die Amplitude nimmt vermutlich zuerst leicht und dann immer stärker ab, da zuerst die nicht komplett ausgebildete Welle reflektiert wird.

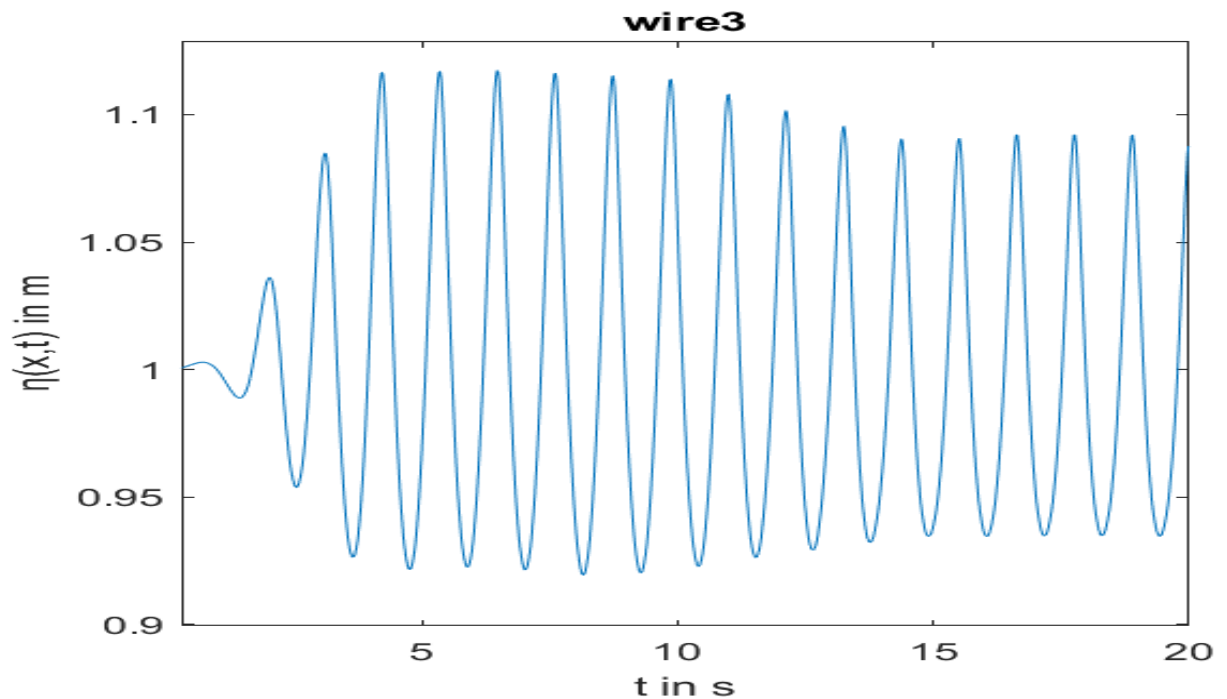


Abbildung 15: Nachbildung einer Welle mit $H = 0,2m$ und $L = 2m$ über $t = 20s$ bei der Erfassung an der Position $x = 1m$.

Um zu überprüfen, ob eine Reflexion der Wellen trotz der Randbedingung, welche ein freies Auslaufen der Wellen ermöglichen soll, auftritt wird die Kanallänge um 1m reduziert. In Abbildung 16 ist zu erkennen das die Amplitude bei verkürzten Wellenkanal (Blaue Kurve) früher abnimmt. Dies untermauert die Vermutung, dass die Randbedingung am Outlet keinen idealen Auslauf der Welle ermöglicht.

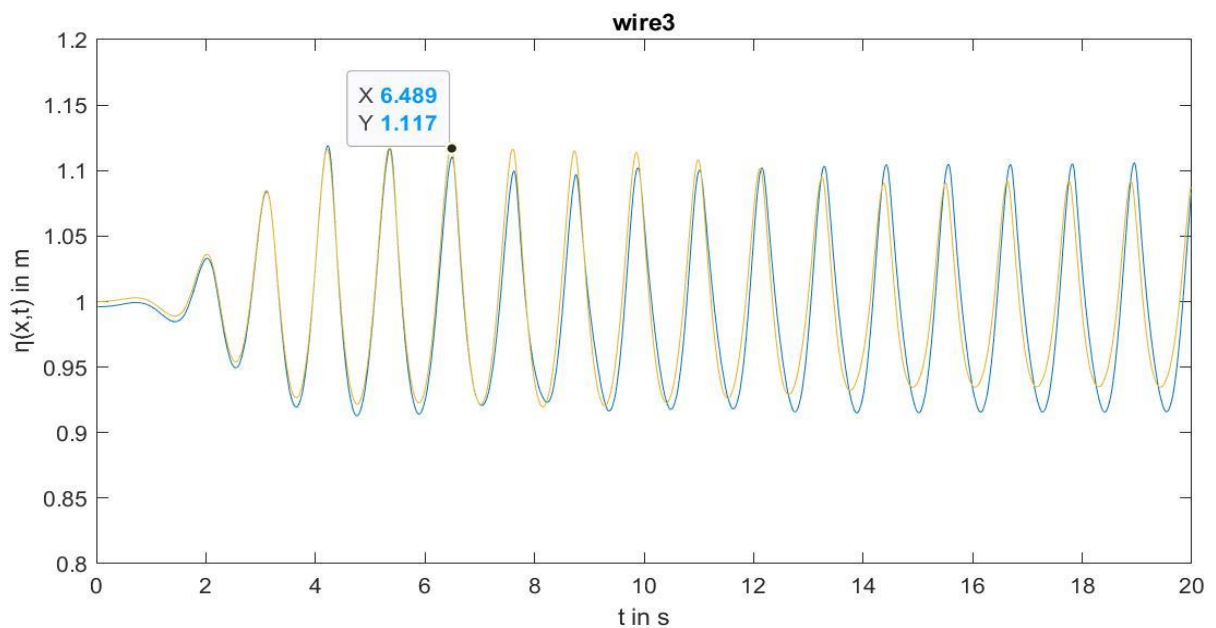


Abbildung 16: Nachbildung einer Welle mit $H = 0,2m$ und $L = 2m$ über $t = 20s$ bei der Erfassung an der Position $x = 1m$ im Vergleich mit einer Wellenkanallänge von $L_k = 4m$ (blaue Kurve) und einer Wellenkanallänge von $L_k = 5m$ (gelbe Kurve).

Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Wellenhöhe einen Einfluss darauf hat, wie stark die Abnahme der Amplitude mit der Zeit ist. Bei Wellen mit einer Wellenhöhe von 0,1 m und einer Wellenlänge von 2 m zeigt sich eine deutlich geringere Verringerung der Amplitude mit der Zeit. Dies ist in Abbildung 17 dargestellt.

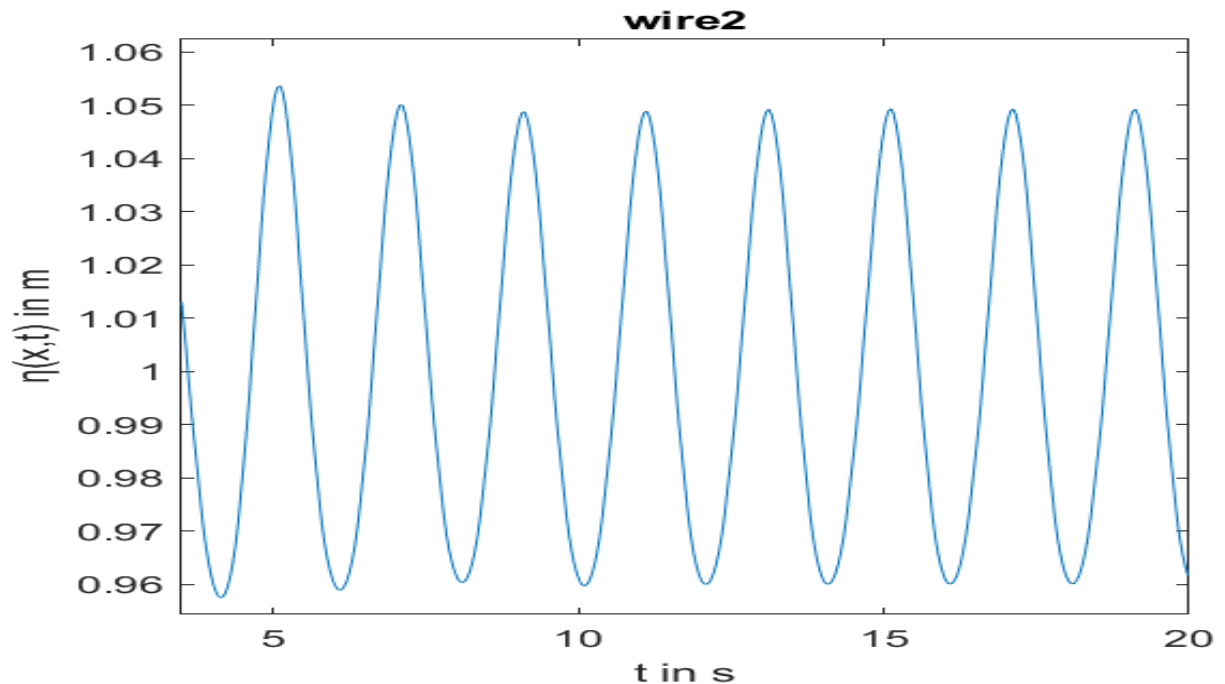


Abbildung 17: Nachbildung einer Welle mit $L = 2m$ und $t = 0,1m$ über $t = 20s$ bei der Erfassung an der Position $x = 1m$.

In der Literatur [5] findet man, dass die Ursache einer Überhöhung der Amplituden in dem großen Dichteunterschied zwischen Luft und Wasser oder in der Oberflächenspannung begründet sein könnte. Daher wird jeweils eine Simulation ohne Oberflächenspannung und eine Simulation mit einem verringerten Dichteunterschied zwischen Luft und Wasser durchgeführt. Dabei zeigt sich keine Veränderung in der Amplitude. Dieser Einfluss kann also ausgeschlossen werden.

Da die Abnahme der Amplitude vermutlich in der Outlet-Randbedingung begründet ist, wird das ohne diese Randbedingung erstellte OpenFOAM-Modell verwendet, um die Absorbervarianten im relativen Vergleich zu untersuchen. Für die Untersuchung der Absorbervarianten wird die Randbedingung an der Rückwand des Wellenkanals so eingestellt, dass die Wellen an der Rückwand reflektiert werden. Hier konnte nicht nachgewiesen werden, ob das verwendete Modell die Auslenkung der freien Oberfläche ausreichend gut darstellt. Das Modell wird jedoch trotzdem verwendet, da aus Zeitgründen keine weiteren Untersuchungen bzw. Validierungen der Welleneigenschaften möglich sind. Außerdem wurde die Welle, welche eine vergleichsweise geringe Wellenhöhe von 1m besitzt, gut dargestellt. Die Welleneigenschaften, Wellenlänge und Periodendauer, aller vier Betriebsarten werden insgesamt gut dargestellt.

4 Ermittlung der Absorber-Güte

Für die Bewertung der Absorbervarianten sind Messstellen nötig, an denen die Auslenkung der freien Oberfläche ermittelt werden kann. In Abbildung 18 ist der Wellenkanal und die Position der Messstellen (Wire1, Wire2, Wire3) abgebildet. Die erste Messstelle befindet sich 1m vom Einlass entfernt. Die Zweite Messstelle 2 m und die Dritte Messstelle 2,7 m. Die Messstellen sind in y-Richtung 0,1 m von der Symmetrie-Randbedingung entfernt, damit die Randbedingung keinen Einfluss auf die Messergebnisse haben kann.

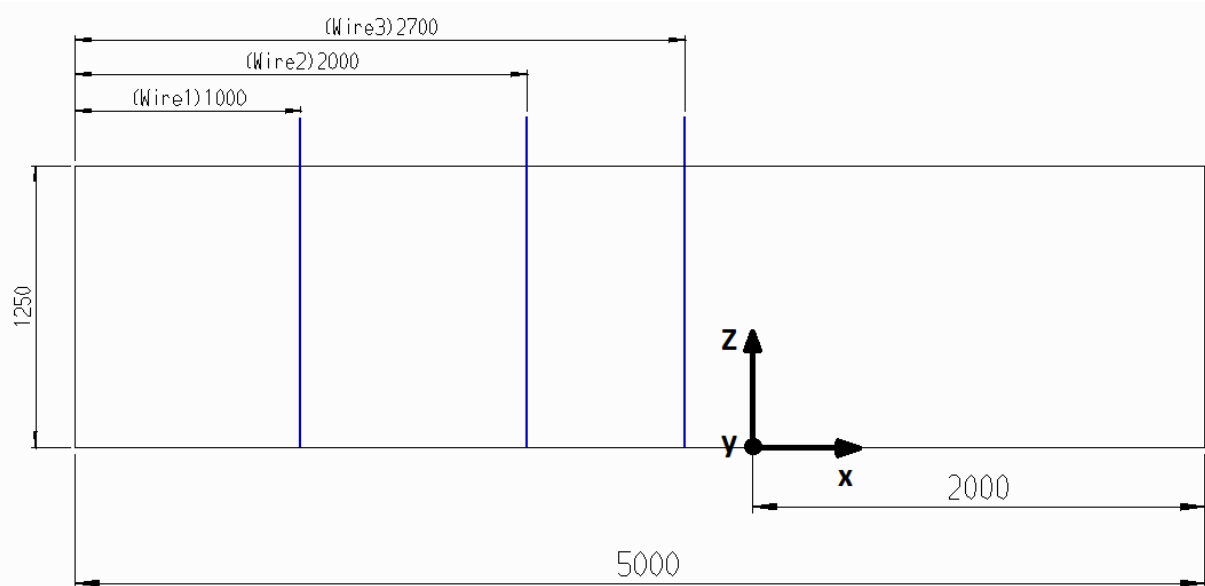


Abbildung 18: Position der Messstellen im Wellenkanal. Der Einlass befindet sich links.

An den Messstellen wird der Zellfüllgrad und die dazu gehörige z-Koordinate bestimmt. Anschließend wird aus dem Zellfüllgrad und den z-Koordinaten die Auslenkung der freien Oberfläche ermittelt. Dies geschieht auf Grundlage eines von Warnecke geschriebenen Matlab-Programms [9]. Das von Warnecke verwendete Matlab-Programm kann nur Messdaten auswerten, welche eine konstante Samplingfrequenz besitzen. Die Samplingfrequenz entspricht dem Schreibintervall des OpenFOAM-Modells. Durch diese Einschränkung kann die Auslenkung der freien Oberfläche nur unpräzise dargestellt werden. Näheres zu dem von Warnecke entwickelten Auswertungsprogramm ist in [9] zu finden.

Das Programm wird angepasst, damit Messdaten, welche keine konstante Samplingfrequenz besitzen, ausgewertet werden können. Dadurch ist es nicht mehr nötig, dass die Samplingfrequenz dem Schreibintervall des OpenFOAM-Modells entspricht. Dies führt aufgrund der größeren Anzahl an Messwerten dazu, dass die Wellen besser dargestellt werden können. Durch die genauere zeitliche Auflösung werden auch Störungen der Welle besser dargestellt.

Um die Güte des Absorbers bewerten zu können, wird die numerisch nachgebildete Welle mit ihrer idealen Form verglichen. Die Methode der Auswertung basiert auf einem Vorschlag von Wulf [8]. Dafür wird zuerst die Zeitreihe mit nicht konstanter Samplingfrequenz auf eine Zeitreihe mit konstanter Samplingfrequenz interpoliert. Dafür wird die Resamplingfunktion von Matlab benutzt. Anschließend wird ein Zeit-Vergleichsvektor erstellt, welcher die gleiche

konstante Samplingfrequenz besitzt. Zum Vergleichsvektor ist die Auslenkung einer idealen Airy-Welle gespeichert. Um die ideale Airy-Welle mit der simulierten Airy-Welle vergleichen zu können, muss die simulierte Welle so verschoben werden, dass beide Wellen phasengleich sind. Dafür wird die sogenannte „Cross-correlation“-Funktion von Matlab verwendet. Mit dieser Funktion wird ermittelt, welche Phasenverschiebung zwischen den beiden Signalen vorliegt. Die Phasenverschiebung Δ_t wird dann beim Vergleichsvektor ausgeglichen. Die beiden nun phasengleichen Signale werden bei verschiedenen Zeitpunkten t_i subtrahiert. Die Differenzen $\Delta\eta_i$ werden nach (Gleichung (4.1)) aufsummiert.

$$\Delta\eta_i = \eta_{gemessen}(t_i) - \eta_{vergleich}(t_i) \quad (4.1)$$

Aus den aufsummierten Differenzen wird die durchschnittliche Abweichung der Messwerte (Gleichung (4.2)) von den idealen Werten bestimmt:

$$AG = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=n_{start}}^{n_{end}} |\Delta\eta_i| \quad (4.2)$$

Dabei ist AG die Absorber-Güte und N die Anzahl der Messwerte im Überdeckungszeitraum zwischen Startwert der Auswertung (n_{start} bzw. t_{start}) und Ende der Auswertung (n_{end} bzw. t_{end})

Im Kapitel 6 wird die Absorber-Güte gemittelt über alle drei Messstellen angegeben:

$$AG_{Durchschnitt} = \frac{AG_{n1} + AG_{n2} + AG_{n3}}{3} \quad (4.3)$$

Dabei ist $AG_{Durchschnitt}$ die durchschnittliche Absorber-Güte, der Index n_i steht für die jeweilige Messstelle.

Die durchschnittliche Absorber-Güte ($AG_{Durchschnitt}$) wird dann durch die Wellenhöhe der jeweiligen Betriebsart dividiert und in einen Prozentwert umgerechnet (Gleichung (2.4)). Damit ist ein Vergleich zwischen den verschiedenen Betriebsarten möglich.

$$AG_{\%} = \frac{AG_{Durchschnitt}}{H} * 100\% \quad (4.4)$$

Über die Absorber-Güte kann abgeschätzt werden wie gut der Absorber die Welle absorbiert. Je mehr die Absorber-Güte von Null abweicht, desto mehr ist die Welle gestört.

Die Startzeit der Auswertung muss so gewählt werden, dass die Welle bereits Anteile einer an den Absorber-Komponenten oder an der Rückwand reflektierten bzw. zurückgelaufenen Welle enthalten kann. Die Startzeit wird daher wie folgt ermittelt:

$$t_{start} = \Delta t_{AnlaufPaddel} + 2 \cdot \frac{L_k}{C_{gr}} \quad (4.5)$$

Dabei ist t_{start} die Startzeit der Auswertung, $\Delta t_{AnlaufPaddel}$ die Zeit für das Anfahren des Paddels, L_k die Länge des Wellenkanals und C_{gr} die Gruppengeschwindigkeit der Wellen nach (Gleichung (2.8)).

Mit dem Verhältnis $\frac{L_k}{C_{gr}}$ wird die Zeit abgeschätzt, bei der eine Welle mit voll aufgebauter Wellenenergie einmal den Kanal durchlaufen hat. Um sicher zu gehen, dass vollständig aufgebaute Wellen auf den Absorber treffen (eingeschwungener Zustand) wird diese Zeit hier verdoppelt.

Damit beträgt beispielsweise die Startzeit der Auswertung für die Betriebsart B1 wie folgt ermittelt:

$$C_{gr} = 0,5 \cdot \frac{5m}{1,18} \cdot \frac{1 + 2 \cdot \pi \cdot 0,5m}{\sinh(2 \cdot \pi \cdot 0,5m)}$$

$$C_{gr} = 1,076 \frac{m}{s}$$

$$t_{start} = 3s + 2 \cdot \frac{5m}{1,076 \frac{m}{s}}$$

$$t_{start} = 12,29s$$

Damit ergeben sich für alle vier Betriebsarten die in Tabelle 5 dargestellten Startzeiten.

Betriebsart	B1	B2	B3	B4
t_{start} in s	12,29	14,08	18,63	19,005

Tabelle 5: Startzeiten t_{start} für die Auswertung.

Für das Ende der Auswertung wird die Zeit aufaddiert, welche die Welle benötigen würde, um einmal den gesamten Wellenkanal zu durchlaufen. Damit ergeben sich die in Tabelle 6 dargestellten Simulationszeiten beziehungsweise Endzeiten für die Auswertung. Die Endzeiten für die Auswertung der Betriebsarten B1 und B2 werden noch etwas erhöht und auf 20 Sekunden gesetzt. Damit ist die Dauer der Simulationen für alle Betriebsarten ungefähr gleich. Es wird ein relativer Vergleich zwischen den Betriebsarten durchgeführt, daher muss gewartet werden bis die Simulationen aller vier Betriebsarten abgeschlossen sind. Deshalb ist eine Erhöhung der Endzeit für die Simulation bzw. Auswertung möglich. Des Weiteren stehen so für die Auswertung der Betriebsarten B1 und B2 mehr Messwerte zur Verfügung.

Betriebsart	B1	B2	B3	B4
t_{ende} in s	16,94 (20)	17,82 (20)	26,46	27,096

Tabelle 6: Endzeiten t_{end} für die Auswertung.

In Abbildung 19 ist die Auswertungsmethode exemplarisch dargestellt. Der Bereich bis zum ersten Abschnitt wird vernachlässigt, weil dort das Paddel erst anlaufen muss. Im Bereich zwischen 1 und 2 haben sich die Störungen der Welle noch nicht komplett ausgebildet, daher wird dieser Bereich nicht betrachtet. Die Auswertung findet im Bereich 2 bis 3 statt. Dort hat sich die Störung der Welle komplett ausgebildet. Man könnte auch sagen, dass sich ab Punkt 2 der Kanal im Modell eingelaufen hat.

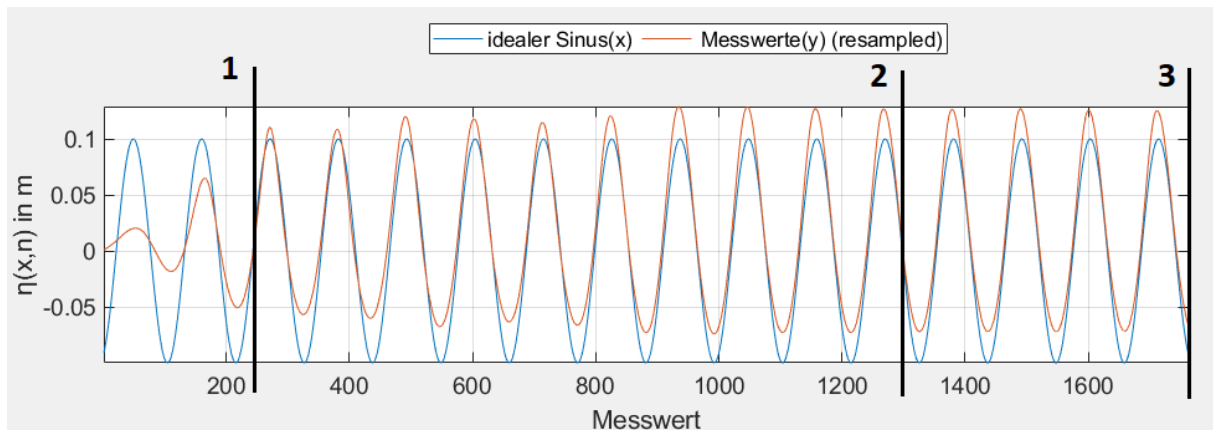


Abbildung 19: Oberflächen Auslenkung einer idealen Airy-Welle (Blau) und einer gemessenen Airy-Welle (Orange) mit $H = 0,2m$ und $L = 2m$ simuliert über $t = 20s$ mit ausgeglichener Phasenverschiebung. Gemessen an der Position $x = 2m$.

Ein Nachteil dieser Auswertungsmethode ist, dass nur lokale Störungen der Welle erfasst werden können. Es ist nicht bekannt, wie weit oder in welchem Maß sich die Störungen, welche an den jeweiligen Messstellen erfasst werden in Längsrichtung des Kanals ausbreiten. Daher wird hier die durchschnittliche Absorber-Güte aller drei Messstellen betrachtet. Ein weiterer Nachteil ist, dass der Einfluss einer möglichen Phasenverschiebung, zwischen Welle und Wellenstörung ausgeglichen wird. Zu sehen ist das Vorhandensein einer Phasenverschiebung zwischen der idealen und der gemessenen Welle bei nicht verwendeter „Cross-correlation“-Funktion im **Anhang B**.

5 Erstellung der Simulationsfälle

In diesem Kapitel werden zunächst Ergebnisse früherer Arbeiten wiedergegeben, welche Informationen zu der Auslegung des Absorbers liefern. Im Anschluss werden die einzelnen Simulationsfälle mit den dazu gehörigen geometrischen Einstellungen vorgestellt.

5.1 Relevante Ergebnisse früherer Arbeiten

Im Folgenden werden Ergebnisse früherer Arbeiten wieder gegeben in denen passive Absorber untersucht wurden. Zuerst wird auf die Untersuchung des Strandabsorbers von Bauck und Hansen [10] eingegangen und im Anschluss auf die Untersuchung der Halbschalenstrukturen von Warnecke [9].

In „Entwurf und Auslegung eines Wellenabsorbers für einen Wellenkanal“ [10] haben Bauck und Hansen bereits einige Untersuchungen zu verschiedenen passiven Absorbern durchgeführt. Ihre Erkenntnisse bezüglich des Strandabsorbers werden im Folgenden aufgeführt. Der Strandabsorber ist sehr effektiv bei kleinen Winkeln. Um gut zu funktionieren soll er maximal einen Reflexionskoeffizienten von 0,1 besitzen. Die wichtigsten Einflussgrößen für den Reflexionskoeffizienten sind der Neigungswinkel und die Steilheit der Wellen. Die Beschaffenheit der Oberfläche hat jedoch auch einen Einfluss. In den von Bauck und Hansen aufgeführten Oberflächenstrukturen hat eine glatte Oberfläche die geringste Wirkung und eine raue Tetrapoden Struktur die beste Wirkung auf die Dämpfung der Welle.

Zuerst wurde der Einfluss des Neigungswinkels im Zusammenhang mit der Oberflächenstruktur untersucht. Es wurde festgestellt, dass bei einer glatten Oberfläche der Reflexionskoeffizient bei einem Neigungswinkel von 20° bereits nah bei 0,1 liegt. Für eine aus Tetrapoden gebildete Oberfläche wird der Reflexionskoeffizient von 0,1 schon bei ungefähr 40° erreicht.

Als nächstes wurde der Einfluss der Wellensteilheit auf den Reflexionskoeffizienten untersucht. Es wurde festgestellt, dass sich die Wellensteilheit antiproportional zu dem Reflexionskoeffizienten verhält. Bei zunehmender Wellensteilheit sinkt der Reflexionskoeffizient. Dies bedeutet das steilere Wellen leichter absorbiert werden können. Dies bedeutet jedoch auch, dass flache Wellen einen größeren Reflexionskoeffizienten besitzen. So wurde festgestellt, dass der Reflexionskoeffizient bei einem Winkel von 40° und einer Wellensteilheit von 0,05 bereits 0,28 und nicht mehr 0,1 beträgt. Um auch flache Wellen mit einer Steilheit von 0,05 effektiv absorbieren zu können, muss der Winkel 20° betragen. Ein breites Wellenspektrum kann also nur mit einem möglichst flachen Strand-Absorber ausreichend absorbiert werden. Dies ist in Abbildung 20 zu sehen, wo der Reflexionskoeffizient über der Wellensteilheit dargestellt ist, zu sehen.

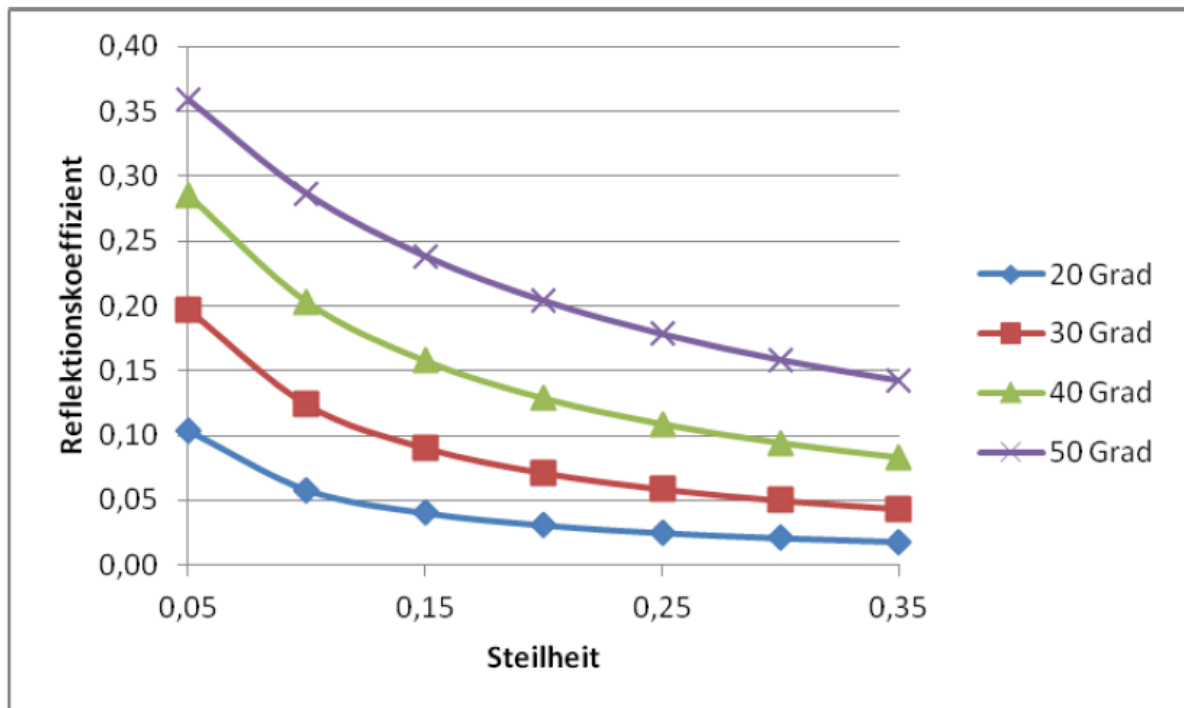


Abbildung 20: Reflexionskoeffizient über Wellensteilheit bei einem passiven Strandabsorber nach [10].

Des Weiteren wurde festgestellt, dass der Strandabsorber aus der Wasseroberfläche herausragen sollte, damit ein Auslauf vorhanden ist. Damit dies für verschiedene Füllhöhen gewährleistet ist, soll der Abstand des Strandabsorbers zum Boden verstellbar sein. Außerdem sollen der Neigungswinkel und die vertikale Verschiebung des Strandabsorbers variabel sein. Zuzüglich sei ein Abstand zum Boden und Rückwand des Wellenkanals nötig, damit Wasser hinter den Strandabsorber fließen und dann wieder unter ihm hindurch strömen kann. Damit wird verhindert, dass die Wellen an der Rückwand des Wellenkanals reflektiert werden beziehungsweise zurückströmen. Um die Oberfläche des Strandabsorbers möglichst effektiv nach zu gestalten, sollte laut Bauck und Hansen ein Rasengitter verwendet werden.

Die von Bauck und Hansen herausgearbeiteten Konstruktionsideen bilden eine gute Grundlage für die Untersuchung des Absorbers. Die Konstruktionsvorschläge basieren jedoch auf sehr theoretischen Überlegungen. Daher ist zu prüfen, ob der Strandabsorber bei kleineren Winkeln besser funktioniert, steilere Wellen besser gedämpft werden als flache, die Höhe der Platte dem Füllstand angepasst werden muss, ein Abstand zum Boden und Rückwand vorhanden sein muss und ob eine Aufrauhung der Oberfläche durch ein Rasengitter die Absorption der Wellen verbessert. Diese Variationen werden in dieser Bachelorarbeit näher analysiert.

In „Simulation und Optimierung eines Wellenabsorbers für den Wellenkanal der HAW“ [9] hat Warnecke einige Simulationen für Halbschalenstrukturen durchgeführt mit dem Ziel, eine möglichst gute Dämpfung der einlaufenden Wellen zu erreichen. Das Funktionsprinzip besteht darin, dass die Halbschalenstruktur auf der Zulaufseite einen geringeren Widerstandsbeiwert besitzt als auf der Rücklaufseite. Dadurch sollen die rücklaufenden Wellen abgefangen und die zulaufenden Wellen leichter durchgelassen werden. Die von Warnecke gewonnen

Erkenntnisse werden im Folgenden aufgeführt. Es wurden mehrere Absorber-Set-Ups entworfen und untersucht. Dabei wurde der Durchmesser, die Kaskadenanzahl und der Abstand zwischen den Halbschalenstrukturen variiert. Es wurde festgestellt, dass alle von den untersuchten Varianten die Wellenhöhe hinter dem Absorber reduzieren. Der Absorber hat in den meisten Fällen keinen Einfluss auf die Periodendauer, da diese konstant bleibt. Daher bleiben auch die Wellenlänge und die Ausbreitungsgeschwindigkeit konstant, da diese aus der Periodendauer berechnet werden. Warnecke schränkt ein, dass die Ergebnisse möglicherweise auch auf die geringe Samplingfrequenz zurückzuführen sein könnten. Die Auslenkung der freien Oberfläche wurde nur alle 0,2 Sekunden erfasst.

Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Dämpfung der Wellen stärker ausfällt, wenn die einlaufende Welle eine geringere Wellenhöhe und Wellenlänge besitzt. Eine noch stärkere Dämpfung tritt bei einer Verringerung der Wassertiefe ein.

Es hat sich herausgestellt, dass ein 5-4-5 Set-Up mit einem Nenndurchmesser der Halbrohre von 160mm und einen Mittelpunktabstand von 200mm die besten Absorptionseigenschaften besitzt. Dargestellt ist dieses Set-Up in Abbildung 23.

In Bezug auf die geometrischen Parameter wurde festgestellt, dass eine höhere Anzahl an Halbschalenstrukturen und ein geringer Abstand zwischen den Halbschalen sich positiv auf die Dämpfung der einlaufenden Welle auswirkt.

Die von Warnecke bereits herausgearbeitete Einstellung für die Halbschalenstruktur wird in dieser Bachelorarbeit übernommen.

5.2 Simulationsfälle

In diesem Kapitel werden die Einstellungen der geometrischen Parameter vorgestellt. Es wird der Neigungswinkel, die horizontale Verschiebung, die vertikale Verschiebung, die Anzahl und der Durchmesser der Öffnungen variiert. Danach wird die Aufrauung der Oberfläche durch Waben berücksichtigt. Im Anschluss werden der Durchmesser und die Anzahl der Halbschalen untersucht. Am Ende wird die Plattenlänge verändert, obwohl bereits eine Platte mit einer Länge von zwei Metern für Versuche beschafft wurde. Die Plattendicke wird auf 25mm eingestellt, dies entspricht der Dicke der vorhandenen Platte.

In Abbildung 21 sind die geometrischen Parameter: Vertikale Verschiebung vV , horizontale Verschiebung hV , Neigungswinkel α und Plattenlänge L dargestellt. Die vertikale Verschiebung stellt den Abstand zwischen Fußpunkt der Platte und Boden dar. Die horizontale Verschiebung sagt, aus wie weit der Kopfpunkt der Platte von der Rückwand entfernt ist.

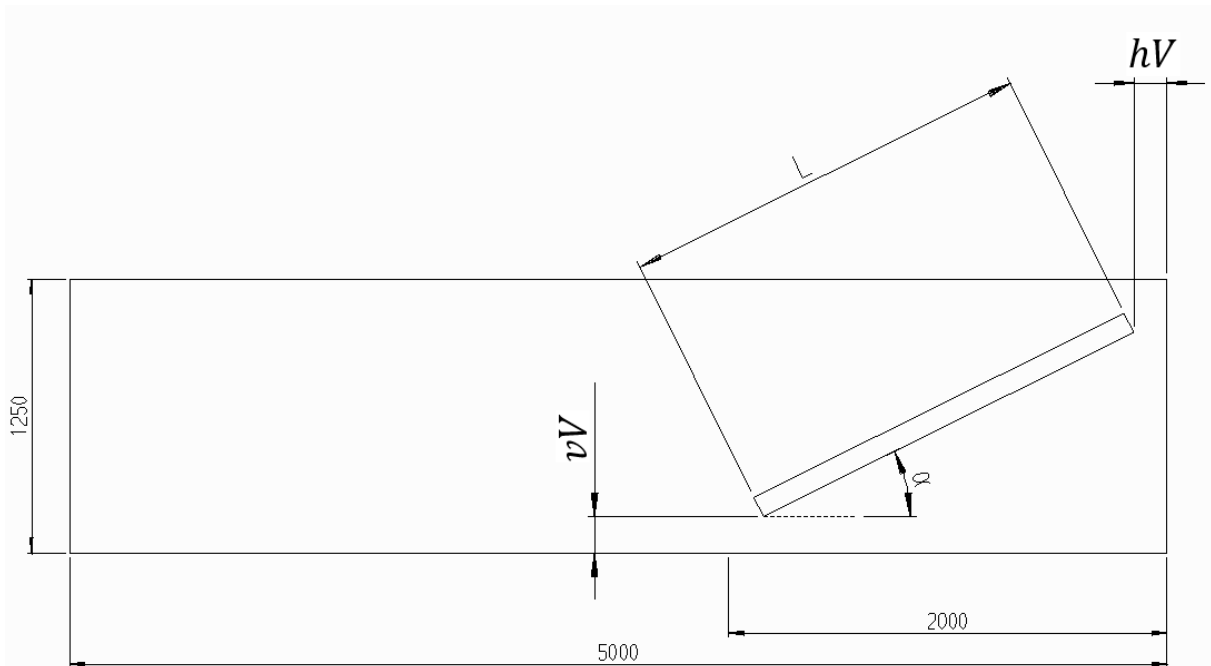


Abbildung 21: Geometrische Parameter der Platte: Vertikale Verschiebung (vV), horizontale Verschiebung (hV), Neigungswinkel (α) und Plattenlänge (L).

5.2.1 Neigungswinkel ohne Abstand zur Rückwand

Bei diesen Simulationen liegt der Kopfpunkt des Strandabsorbers an der Rückwand des Wellenkanals an. Dadurch kann der Einfluss des Neigungswinkels ohne den Abstand zur Rückwand untersucht werden. Außerdem wäre es positiv für die Verkürzung des für den Absorber nötigen Kanalbereichs, wenn der Absorber ohne Abstand zur Rückwand eine gute Absorptionsfähigkeit besitzen würde. Die vertikale Verschiebung der Platte wird jedoch bei Veränderung des Neigungswinkels angepasst, da ansonsten nur ein sehr kleiner Bereich an Neigungswinkeln untersucht werden kann. Der Strandabsorber soll sich bei jedem Versuch über dem Wasserspiegel befinden. Die Einstellungen für Betriebsart B2 und B4 sind in Tabelle 7 dargestellt. In Tabelle 8 sind die Einstellungen für Betriebsart B1 und B3 zu finden.

Betriebsart	α in°	vV in m	hV in m
B2/B4	20	0,121	0
B2/B4	25	0,350	0
B2/B4	30	0,200	0
B2/B4	35	0,050	0

Tabelle 7: **Einstellungen:** Variation des Neigungswinkels und der vertikalen Verschiebung ohne Abstand zur Rückwand. Betriebsart: B2 und B4.

Betriebsart	α in°	vV in m	hV in m
B1/B3	15	0,200	0
B1/B3	20	0,100	0
B1/B3	25	0,000	0
B1/B3	30	0,000	0

Tabelle 8: **Einstellungen:** Variation des Neigungswinkels und der vertikalen Verschiebung ohne Abstand zur Rückwand. Betriebsart: B1 und B3.

5.2.2 Neigungswinkel mit Abstand zur Rückwand

Als nächstes wird untersucht, welchen Einfluss ein Abstand zwischen Rückwand des Wellenkanals und Kopfpunkt des Strandabsorbers hat. Dabei wird die Freibordhöhe bei jedem Versuch so eingestellt, dass sie ungefähr der halben Wellenhöhe (0,09 m), beider zu untersuchenden Wellenformen entspricht. Der Abstand zwischen Kopfpunkt des Strandabsorbers und Rückwand des Wellenkanals wird auf 0,4 m gesetzt. Durch den Abstand zwischen Rückwand und Strandabsorber wird der Bauraum von 2 m überschritten, dies ist aber nach Aussage des Betreuers dieser Bachelorarbeit noch akzeptabel. Es werden Neigungswinkel von 20, 25 und 30 Grad untersucht, um feststellen zu können, ob sich hier ein flacherer Neigungswinkel positiv auswirkt. Eine bessere AG bei kleinerem Neigungswinkel würde der Theorie entsprechen. Die Einstellungsparameter sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Betriebsart	α in°	vV in m	hV in m
B1,B2,B3,B4	20	0,406	0,4
B1,B2,B3,B4	25	0,245	0,4
B1,B2,B3,B4	30	0,090	0,4

Tabelle 9: **Einstellungen:** Variation des Neigungswinkels bei konstantem Abstand zur Rückwand und einheitlicher Freibordhöhe (0,09 m). Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.

5.2.3 Vertikale Verschiebung

Im Anschluss wird untersucht, welchen Einfluss der Abstand zwischen Boden und Fußpunkt des Absorbers hat. Dafür wird die vertikale Verschiebung in 0,1 m Schritten variiert. Bei den Betriebsarten mit einem Füllstand von 0,5 m, wird der Abstand zum Boden verringert (Tabelle 10). Bei den Betriebsarten mit einem Füllstand von 1 m, wird der Abstand zum Boden erhöht und damit die Freibordhöhe vergrößert Tabelle 11. Eine Verringerung der Freibordhöhe würde bei den Betriebsarten mit einem Füllstand 1m (B2 und B4) dazu führen, dass die Platte sich komplett unter dem Wasserspiegel befindet. Dies soll hier vermieden werden. Es wird die vertikale Verschiebung für die Winkel 20, 25 und 30 Grad verändert, um daraus gegebenenfalls ableiten zu können, ob die Höhe der Platte an den Füllstand angepasst werden muss.

Betriebsart	α in°	vV in m	hV in m
B1/B3	20	0,406	0,4
B1/B3	20	0,306	0,4
B1/B3	20	0,206	0,4
B1/B3	20	0,106	0,4
B1/B3	20	0	0,4
B1/B3	25	0,245	0,4
B1/B3	25	0,145	0,4
B1/B3	25	0,045	0,4
B1/B3	25	0	0,4
B1/B3	30	0,090	0,4
B1/B3	30	0,000	0,4

Tabelle 10: **Einstellungen:** Variation der vertikalen Verschiebung bei ausgewählten Neigungswinkeln und konstanten Abstand zur Rückwand. Betriebsart: B1 und B3.

Betriebsart	α in°	Vv in m	Hv in m
B2/B4	20	0,406	0,4
B2/B4	20	0,506	0,4
B2/B4	25	0,245	0,4
B2/B4	25	0,345	0,4
B2/B4	30	0,09	0,4
B2/B4	30	0,19	0,4

Tabelle 11: **Einstellungen:** Variation der vertikalen Verschiebung bei ausgewählten Neigungswinkeln und konstanten Abstand zur Rückwand. Betriebsart: B2 und B4.

5.2.4 Horizontale Verschiebung

Außerdem wird untersucht, ob ein optimaler Abstand zwischen der Rückwand des Wellenkanals und dem Absorber existiert. Dafür wird die horizontale Verschiebung in 0,1 m Schritten verringert. Im letzten Schritt liegt die Platte direkt an der Wand an. Die vertikale Verschiebung wird konstant gehalten. Die Simulationsfälle sind in Tabelle 12 aufgelistet.

Betriebsart	α in°	vV in m	hV in m
B1, B2, B3, B4	25	0,245	0,4
B1, B2, B3, B4	25	0,245	0,3
B1, B2, B3, B4	25	0,245	0,2
B1, B2, B3, B4	25	0,245	0,1
B1, B2, B3, B4	25	0,245	0

Tabelle 12: **Einstellungen:** Variation der horizontalen Verschiebung, bei einem ausgewählten Neigungswinkel und konstanten Abstand zum Boden. Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.

5.2.5 Öffnungen und Wabenstruktur

Des Weiteren wird untersucht, welchen Einfluss Öffnungen auf die Absorber-Güte haben. Dafür werden die Fälle

- Wenige große Öffnungen
- Viele kleine Öffnungen
- Und Viele große Öffnungen

untersucht. Die Einstellungen sind in Tabelle 13 zu finden.

In Abbildung 22 ist schematisch die Platte mit Öffnungen dargestellt. L ist die Länge der Platte, b die Breite und D der Durchmesser der Öffnungen. Die Anzahl der Öffnungen in Längsrichtung wird als nL und die Anzahl der Öffnungen über die Breite wird als nW bezeichnet.

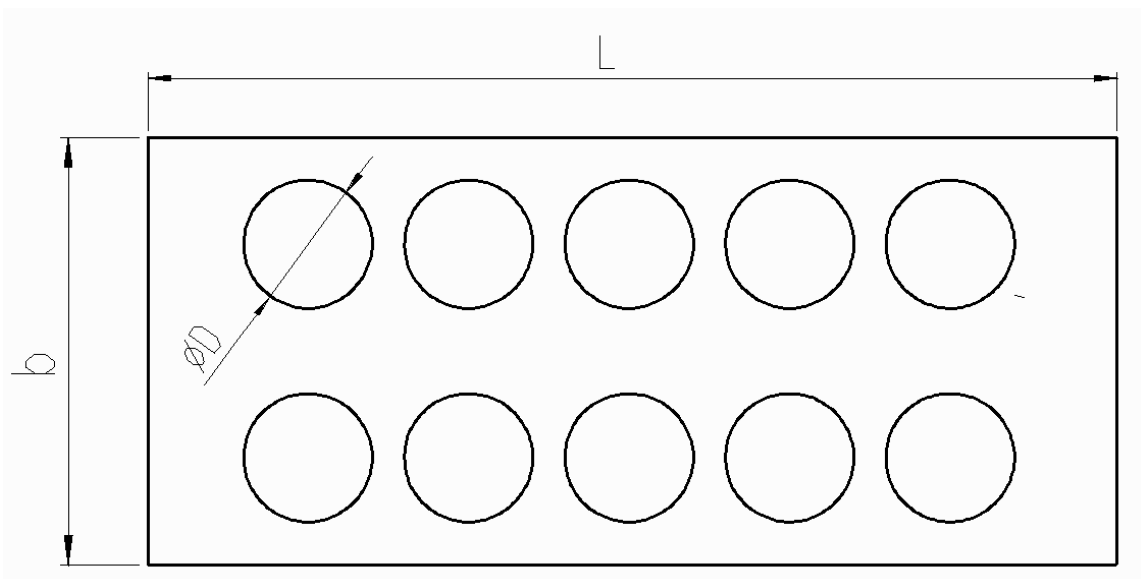


Abbildung 22: Geometrische Parameter der Platte mit Öffnungen: Plattenlänge L , Breite b , Öffnungsdurchmesser D , beispielhaft mit $nL = 5$ und $nW = 2$.

Betriebsart	vV in m	hV in m	α in°	nL	nW	n	D in m
B1	0,245	0,4	25	4	3	12	0,1
B1	0,245	0,4	25	8	6	48	0,05
B1	0,245	0,4	25	8	6	48	0,1

Tabelle 13: **Einstellungen:** Variationen der Öffnungen bei einem ausgewählten Neigungswinkel und konstanten Abstand zur Rückwand. Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.

Im Anschluss an die Untersuchung der Öffnungen wird die Aufrauhung durch eine Wabenform untersucht. Es wird der Einfluss der Aufrauhung mit und ohne Öffnungen untersucht.

Betriebsart	vV in m	hV in m	α in°	Waben	Öffnungen
B1,B2,B3,B4	0,245	0,4	25	ja	ja
B1,B2,B3,B4	0,245	0,4	25	ja	nein

Tabelle 14: **Einstellungen:** Waben bei einem ausgewählten Neigungswinkel und konstanten Abstand zur Rückwand mit/ohne Öffnungen. Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.

5.2.6 Nenndurchmesser und Kaskadenanzahl der Halbschalen

Es wird zuerst der Nenndurchmesser der Halbschalen und im Anschluss die Kaskadenanzahl verringert. Die Kaskadenanzahl sagt aus, wie viele Reihen von Halbschalen verwendet werden. Nach einer geraden Reihe von Halbschalen folgt eine ungerade Reihe. Die Kaskadenanzahl (nK) wird von der Rückwand aus zum Fußpunkt der Platte von 5 auf 2 verringert. Die Position der senkrecht auf der Platte stehenden Halbschalen wird nicht verändert. Die Halbschalen sind so angebracht, dass sie am Fuß der Platte beginnen. Für die Untersuchung der Halbschalenstruktur wird die Einstellung von Warnecke verwendet (siehe Abbildung 23).

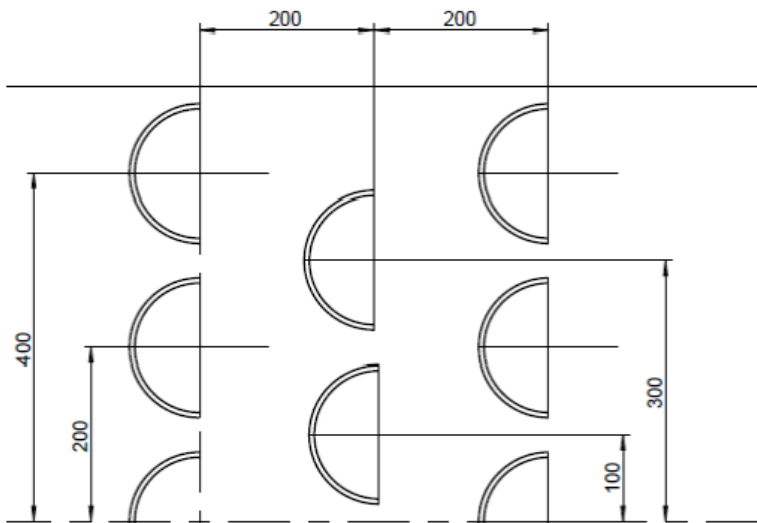


Abbildung 23: Ausgewählte Halbschalenstruktur in der Draufsicht mit DN 160 mm nach [4].

Betriebsart	vV in m	hV in m	α in°	Waben	Öffnungen	DN in mm	nK
B1,B2,B3,B4	0,245	0,4	25	nein	ja	160	5
B1,B2,B3,B4	0,245	0,4	25	nein	ja	140	5
B1,B2,B3,B4	0,245	0,4	25	nein	ja	120	5
B1,B2,B3,B4	0,245	0,4	25	nein	ja	100	5
B1,B2,B3,B4	0,245	0,4	25	nein	ja	80	5

Tabelle 15: **Einstellungen:** Variationen des Nenndurchmessers der Halbschalen bei einheitlicher Kaskadenanzahl (nK). Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.

Betriebsart	vV in m	hV in m	α in°	Waben	Öffnungen	DN in mm	nK
B1,B2,B3,B4	0,245	0,4	25	nein	ja	160	5
B1,B2,B3,B4	0,245	0,4	25	nein	ja	160	4
B1,B2,B3,B4	0,245	0,4	25	nein	ja	160	3
B1,B2,B3,B4	0,245	0,4	25	nein	ja	160	2

Tabelle 16: **Einstellungen:** Variationen der Kaskadenanzahl bei ausgewählten Nenndurchmesser. Betriebsart B1, B2, B3 und B4.

Zum Schluss der Untersuchungen wird die Plattenlänge variiert. Die Plattenlänge wird zunächst um 0,2 m und dann um 0,4 m vergrößert. Bei der Veränderung der Plattenlänge wird darauf geachtet, dass die Freibordhöhe von ungefähr 0,09 m beibehalten wird. Daher muss der Abstand zum Boden angepasst werden. In Tabelle 17 sind die Einstellungen abgebildet.

Betriebsart	vV in m	hV in m	L in m	α in°	Waben	Öffnungen	DN in mm	nK
B1,B2,B3,B4	0,245	0,4	2	25	0	1	160	4
B1,B2,B3,B4	0,160	0,218	2,2	25	0	1	160	4
B1,B2,B3,B4	0,080	0,037	2,4	25	0	1	160	4

Tabelle 17: **Einstellungen:** Variationen der Plattenlänge bei einheitlicher Freibordhöhe und Neigungswinkel mit zugeschalteten Halbschalen (DN 160 mm), Kaskadenanzahl von 4. Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.

6 Auswertung der Simulationsfälle

Im Folgenden werden die zuvor erstellten Simulationsfälle ausgewertet. In diesem Kapitel wird für die Übersichtlichkeit nur die durchschnittliche Absorber-Güte der drei Messstellen vorgestellt.

Der Referenzfall ist in dem ersten Unterkapitel 6.1.1 die sich ergebende AG, wenn kein Absorber vorhanden ist. In diesem Fall werden die Wellen an der Rückwand des Wellenkanals reflektiert. Für die nachfolgenden Unterkapitel ist der Referenzfall die AG des jeweils vorangegangenen gemeinsamen Optimalfalls. Der Optimalfall der jeweiligen Untersuchung ist durch eine gelbe Markierung hervorgehoben. Der Optimalfall ist im Folgenden der Fall mit der geringsten Absorber-Güte. Es wird versucht einen Absorber auszulegen der alle vier Betriebsarten ausreichend in der Amplitude dämpft.

Die vollständigen Auswertungsunterlagen zu jeder Versuchsreihe sind im **Anhang A** zu finden. Im **Anhang B** sind Graphen mit der Auslenkung der freien Oberfläche zu finden. Die Auslenkung der freien Oberfläche ist jedoch nur für ausgewählte Fälle abgebildet. Die „Cross-correlation“-Funktion ist bei diesen Graphen nicht aktiv.

6.1 Auswertung der Simulationsfälle des Strandabsorbers

Zunächst werden die Simulationsfälle für den Strandabsorber, welcher durch eine Platte gebildet wird, ausgewertet.

6.1.1 Variation des Neigungswinkels ohne Abstand zur Rückwand

In Tabelle 18 sind die Ergebnisse der Auswertung für diese Versuchsreihe dargestellt. Für Betriebsart B1 wird der Bestwert bei einem Neigungswinkel von 15° erreicht, für die Betriebsart B3 bei 30° . Für die Betriebsarten B2 und B4 wird bei 20° der Bestwert erreicht. Bei den Betriebsarten B1 und B2 werden bessere Absorber-Güten erzielt als bei den Betriebsarten B3 und B4. Die Absorber-Güte der dritten Betriebsart wird mit zunehmendem Winkel besser. Bei Betriebsart B4 und einem Neigungswinkel von 25° ist die Absorber-Güte am schlechtesten von allen untersuchten Betriebsarten und Einstellungen. Die AG der Betriebsart B3 ändert sich im Vergleich zu den Betriebsarten B1, B2 und B4 stärker bei Änderung des Neigungswinkels. Des Weiteren unterscheiden sich die AG nur um maximal 1,97%. Diese maximale Abweichung tritt bei Betriebsart 3 zwischen 15° und 30° auf. Bei Betriebsart 4 und einem Winkel von 20° wäre die Differenz zwar größer, jedoch stellt diese Versuchsreihe eher einen Ausnahmefall mit einer ungewöhnlich schlechten AG dar.

α in°	AGB1 in %	AGB3 in %	AGB2 in %	AGB4 in %
15	9,266	15,88	-	-
20	9,883	16,53	9,583	12,97
25	9,3	14,044	11,78	17,02
30	8,833	13,91	10,2	13,6
35	-	-	10	13,17
Referenz	15,22	18,9	12,45	17,87

Tabelle 18: **Auswertung:** Variation des Neigungswinkels und der vertikalen Verschiebung ohne Abstand zur Rückwand/ Boden. Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.

Die steileren Wellen (Betriebsart B3 und B4) werden vermutlich schlechter gedämpft, da sie durch ihre große Steilheit leicht brechen können, wenn ihre Wellenhöhe durch konstruktive Interferenz weiter verstärkt wird. Durch die konstruktive Interferenz bleibt die Wellenlänge konstant und die Wellenhöhe nimmt zu. Dadurch steigt die Steilheit der Wellen an.

Außerdem zeigt sich, dass die Wellen bei allen untersuchten Neigungswinkeln als Sturzbrecher brechen, exemplarisch ist dies in

Abbildung 24 dargestellt. Dass alle Wellen als Sturzbrecher brechen, passt mit der Iribarren-Zahl zusammen, welche (nach Gleichung (2.15)) für alle untersuchten Neigungswinkel und Betriebsarten zwischen $\zeta_0 = 0,69$ bis $\zeta_0 = 2,2$ liegt. Sturzbrecher erzeugen relativ geringe Reflexionen.

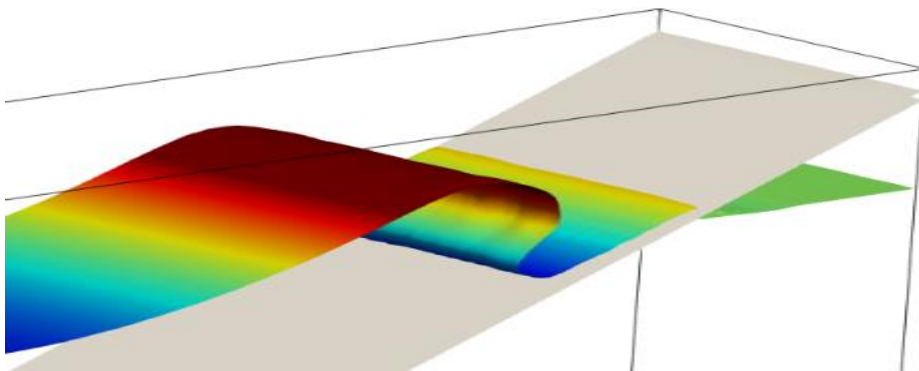


Abbildung 24: Exemplarische Darstellung eines Sturzbrechers. Gezeigt an Betriebsart B2 mit den geometrischen Parametern: $\alpha = 25^\circ$, $vV = 0,350m$ und $hV = 0,187m$.

Zuzüglich ist zu erkennen, dass bei jedem Neigungswinkel Wasser den Strandabsorber hoch strömt und danach wieder zurückfließt, dies ist in Abbildung 25 dargestellt. Die verschiedenen AG unterscheiden sich vermutlich so wenig von einander, da im untersuchten Bereich nicht der Neigungswinkel, sondern das zurückfließende Wasser ausschlaggebend ist. Das Wasser fließt zurück, wodurch die als nächstes auf die Platte auflaufende Welle gestört wird. Je größer die Strecke ist, welche das Wasser beim Auflaufen zurücklegt, desto größer ist seine potentielle Energie und damit auch die Geschwindigkeit beim Zurückfließen. Das auflaufende Wasser erreicht in Abbildung 25 die Rückwand, dies ist nur bei Betriebsart B1 und B2 der Fall.

Die Wellen der Betriebsart B1 und B2 besitzen die größte Wellenhöhe, daher auch die größte Energie (Gleichung 2.9). Die Wellen der Betriebsart B3 und B4 besitzen eine geringere Wellenhöhe, damit auch eine geringere Energie, wodurch sie nicht so weit auf die Platte auflaufen.

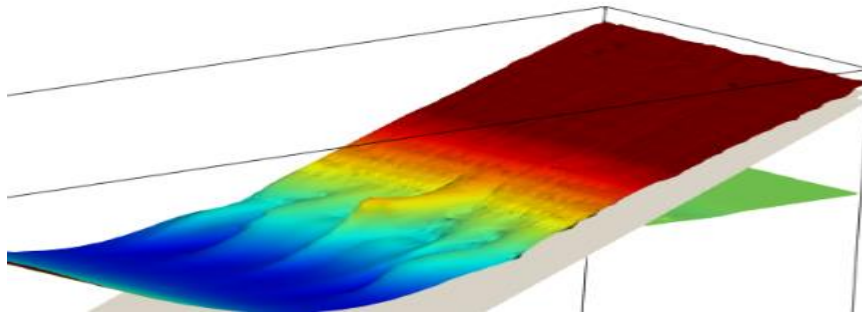


Abbildung 25: Auf die Platte auflaufende Welle mit Erreichen der Rückwand. Gezeigt an Betriebsart B2 mit den geometrischen Parametern: $\alpha = 25^\circ$; $vV = 0,350m$ und $hV = 0,187m$.

Des Weiteren fällt auf, dass der kleinste Winkel nicht immer die beste AG ermöglicht. Das könnte damit zusammenhängen, dass der Neigungswinkel und die vertikale Verschiebung des Strandabsorbers gleichzeitig geändert wurden. Bei Betriebsart B3 fällt dies besonders auf. Die AG ist bei einem Winkel von 20° schlechter als bei einem Winkel von 25° , bei einem Winkel von 25° ist die vertikale Verschiebung mit $0,35\text{ m}$ jedoch auch am größten.

Alle untersuchten Neigungswinkel haben bereits eine Verbesserung der AG erzielt. Die Ergebnisse entsprechen nicht der Theorie. Der Theorie nach müsste bei den kleinsten Neigungswinkeln auch die beste Absorber-Güte erreicht werden. In der Theorie wird jedoch nicht berücksichtigt das ein Abstand zwischen Boden und Fußpunkt des Absorbers vorhanden ist. Die steileren Wellen (B3 und B4) werden nicht besser gedämpft als die flachen.

Mit dem Strandabsorber ohne zusätzliche Geometrien und ohne Abstand zur Rückwand kann keine ausreichende Absorber-Güte erzielt werden.

6.1.2 Variation des Neigungswinkels bei vorhandenem Abstand zur Rückwand

Die Ergebnisse für diese Versuchsreihe sind in Tabelle 19 zu sehen. Für alle Betriebsarten wird ein Optimum bei einem Winkel von 25° , einer vertikalen Verschiebung von $0,245\text{ m}$ und einem Abstand zur Rückwand von $0,4\text{ m}$ erreicht. Bei den Betriebsarten B2 und B4 verändert sich die AG nur wenig bei Veränderung des Winkels. Für die Betriebsarten B1 und B2 werden auch hier bessere Absorber-Güten als für die Betriebsarten B3 und B4 erreicht. Bei Betriebsart B1, einem Winkel von 20° und einer vertikalen Verschiebung von $0,406\text{ m}$ ist die Absorber-Güte wesentlich schlechter als bei den anderen Einstellungen.

α in°	vV in m	hV in m	AGB1 in %	AGB3 in %	AGB2 in %	AGB4 in %
20	0,406	0,4	13,83	14	9,05	12,57
25	0,245	0,4	9,733	13	8,45	12,36
30	0,090	0,4	10,61	16,26	8,73	12,57
Referenz			8,833	13,91	9,583	12,97

Tabelle 19: **Auswertung:** Variation des Neigungswinkels bei konstantem Abstand zur Rückwand und einheitlicher Freibordhöhe (0,09 m). Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.

Bei dieser Versuchsreihe zeigt sich, dass ein Abstand zur Rückwand einen positiven Einfluss auf die Absorber-Güte, der Betriebsarten B2, B3 und B4 hat. Bei Betriebsart B1 ist die Absorber-Güte jedoch für jeden Winkel schlechter als in der vorangegangenen Versuchsreihe. Dass die Absorber-Güte bei Betriebsart B1 schlechter wird, könnte mit dem Verhältnis aus Wassertiefe zu Wellenlänge zusammenhängen. Bei Betriebsart B1 beträgt das Verhältnis aus Wellenlänge zu Wassertiefe 0,25 damit gehört diese Welle zu den Wellen mittlerer Wassertiefe (Tabelle 3). Die Geschwindigkeit der nach Betriebsart 1 eingestellten Welle nimmt also über die Wassertiefe gesehen nicht so stark ab wie bei den anderen Betriebsarten. Dadurch könnte der Teil der Wellen, welcher unter der Platte hindurch läuft (Abbildung 26) an der Rückwand stärker reflektiert werden. Bei den Versuchsreihen, bei denen die Platte direkt an der Wand an liegt, ist der Abstand zwischen Boden und Platte bei jedem Winkel geringer. Deswegen wurden in der vorherigen Versuchsreihe wahrscheinlich bessere Absorber-Güten für die Betriebsart 1 erreicht.

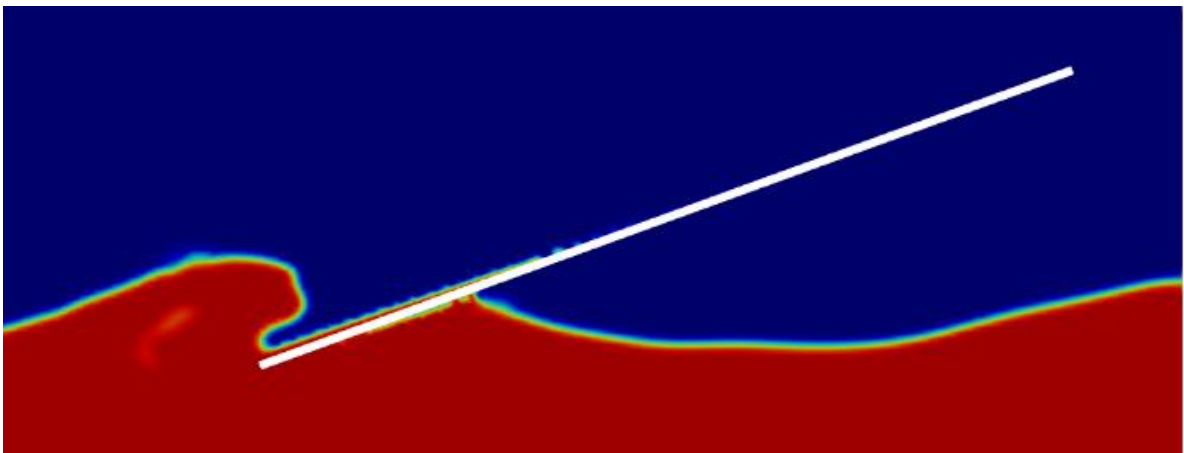


Abbildung 26: Betriebsart B1 mit den geometrischen Parametern: $\alpha = 20^\circ$, $vV = 0,406m$ und $hV = 0,4m$ bei $t = 7,8s$. Wellen laufen unter der Platte durch.

Des Weiteren fällt auf, dass durch den Abstand zur Rückwand die Luft, welche hier als inkompressibel angesehen wird, durch den Spalt zwischen Platte und Kanalrückwand entweichen kann. In den Fällen ohne Abstand zwischen Kopfpunkt der Platte und Kanal Rückwand kann die Luft nicht entweichen (Abbildung 27). Die Luft ist zwischen Platte und Wasseroberfläche eingeschlossen. Dadurch wird die Dynamik des Modells beeinflusst. Durch die sich zwischen Wasseroberfläche und Unterseite der Platte befindliche Luft könnte die Wasserspiegelauslenkung unter der Platte blockiert werden. Die Wellen können unter der Platte nicht beginnen zu schwingen, da sie von der über der Wasseroberfläche befindlichen Luft daran gehindert werden. Im realen Wellenkanal könnte die Luft entweichen, da die Platte

nicht luftdicht an allen Begrenzungsflächen des Wellenkanals anliegt. Dadurch wird die ermittelte AG beeinflusst.

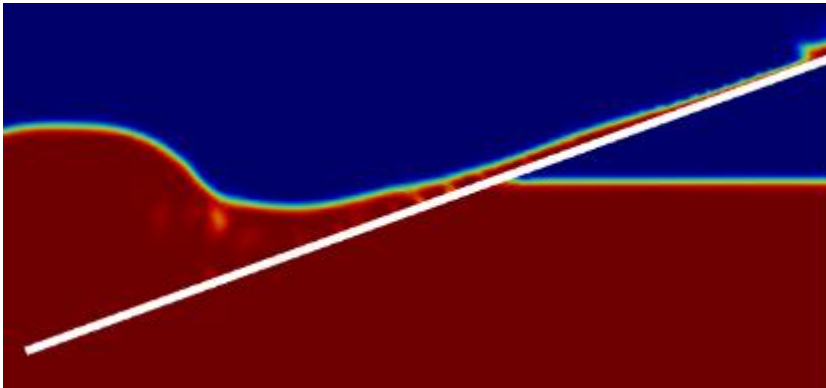


Abbildung 27: Betriebsart B1 mit den geometrischen Parametern: $\alpha = 20^\circ$, $vV = 0,1m$ und $hV = 0m$ bei $t = 16,2s$. Verhinderung der Wasserspiegelauslenkung durch Luftabschluss zwischen Wasseroberfläche und Platte.

Es ist Weiterhin zu erkennen, dass eine Veränderung des Winkels bei den Betriebsarten B2 und B4 keinen großen Einfluss auf die Absorber-Güte hat. Das könnte damit zusammenhängen, dass nach dem Brechen der Wellen das Wasser bei Betriebsart B2 und B4 am Ende der Platte, wie in Abbildung 28 dargestellt, herunterläuft. Dadurch wird die als nächstes auf die Platte zulaufende Welle nicht durch zurücklaufendes Wasser gestört. Des Weiteren wird mit Verringerung des Winkels auch der Abstand zwischen Boden und Fuß der Platte geringer. Dadurch brechen die Wellen bei Betriebsart B1 und B2 plötzlich am Anfang der Platte. Besonders deutlich wird dies bei einem Neigungswinkel von 20° , hier beträgt der Abstand zwischen Boden und Platte $0,406 m$. Dies ist exemplarisch für Betriebsart B1 in Abbildung 26 dargestellt. Bei den Betriebsarten B1 und B3 zeigt sich auch ein Zusammenhang zwischen Winkel und Absorber-Güte.

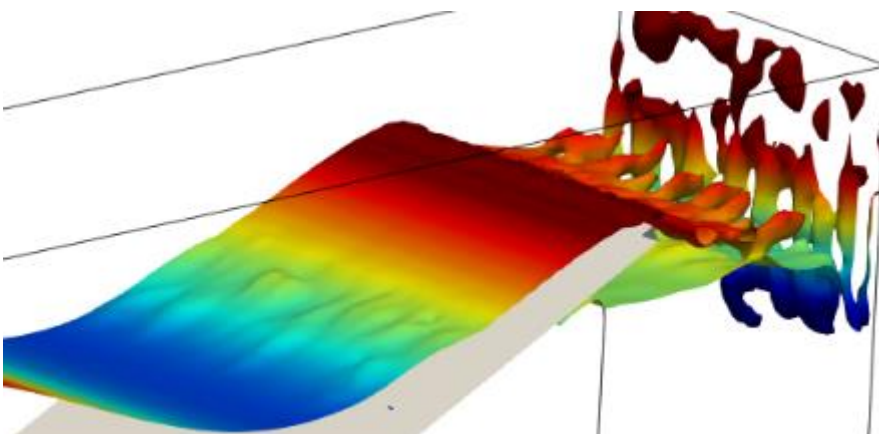


Abbildung 28: Überströmendes Wasser. Abstand zur Rückwand vorhanden. Betriebsart: B2 mit den geometrischen Parametern: $\alpha = 25^\circ$ und $hV = 0,4m$.

Allgemein kann aus dieser Versuchsreihe geschlussfolgert werden, dass ein Abstand zwischen Rückwand und Kopf des Absorbers vorhanden sein sollte. Der Neigungswinkel oder eventuell der Abstand zwischen Boden und Platte hat bei den Betriebsarten B1 und B3 einen

Einfluss. Bei den Betriebsarten B2 und B4 ist kaum ein Zusammenhang zwischen AG und Neigungswinkel festzustellen.

6.1.3 Vertikale Verschiebung

Als erstes wird hier auf die Ergebnisse der Betriebsarten B1 und B3 eingegangen (Tabelle 20), danach auf die Ergebnisse der Betriebsarten B2 und B4 (Tabelle 21).

Für die Betriebsart B1 wird mit einem Winkel von 20° und einer vertikalen Verschiebung von 0,4 m der beste Wert erreicht. Für Betriebsart B3 wird der beste Wert bei einem Winkel von 20° und einer vertikalen Verschiebung von 0,245 m erreicht. Bei den Versuchsreihen mit einem Neigungswinkel von 20° wird die Absorber-Güte für Betriebsart B1 teilweise besser mit abnehmendem Abstand zum Boden. Bei Betriebsart B3 wird die AG teilweise schlechter mit Variation des Abstands zwischen Boden und Platte. Bei einem Neigungswinkel von 20° wird die AG bei Variation der vertikalen Verschiebung in jedem Fall schlechter.

α in°	vV in m	hV in m	AGB1 in %	AGB3 in %
20	0,406	0,4	13,83	14
20	0,306	0,4	11,28	14,2
20	0,206	0,4	12,28	15,38
20	0,106	0,4	11,81	15,6
20	0	0,4	8,25	14,311
25	0,245	0,4	9,73	13
25	0,145	0,4	11,32	15,56
25	0,045	0,4	13,43	13,067
25	0	0,4	12,23	17,09
30	0,090	0,4	10,62	16,26
30	0,000	0,4	13,9	13,58
Referenz			9,733	13

Tabelle 20: **Auswertung:** Variation der vertikalen Verschiebung bei ausgewählten Neigungswinkeln und konstantem Abstand zur Rückwand. Betriebsart: B1 und B3.

Es kann also nicht eindeutig davon ausgegangen werden, dass die Höhe der Platte an den Füllstand angepasst werden muss. Bei einigen Versuchsreihen verbessert sich die AG bei Verringerung der vertikalen Verschiebung und in anderen nimmt sie zu.

Die Ergebnisse der Auswertung für die Betriebsarten B2 und B4 sind in Tabelle 21 dargestellt. Für Betriebsart B2 wird der Bestwert bei einem Winkel von 25° und einem Abstand zum Boden von 0,245 m erreicht. Für Betriebsart B4 wird der Beste Fall bei einem Abstand zum Boden von 0,506 m erreicht.

α in°	vV in m	hV in m	AGB2 in %	AGB4 in %
20	0,406	0,4	9,05	12,58
20	0,506	0,4	9,1	12,31
25	0,245	0,4	8,45	12,36
25	0,345	0,4	9,4	12,58
30	0,09	0,4	8,73	12,58
30	0,19	0,4	9,15	14,2
Referenz			8,45	12,36

Tabelle 21: **Auswertung:** Variation der vertikalen Verschiebung bei ausgewählten Neigungswinkeln und konstanten Abstand zur Rückwand. Betriebsart: B2 und B4.

Das gemeinsame Optimum wird für alle Betriebsarten bei einem Winkel von 25° und einem Abstand zum Boden von 0,245 m erreicht. Die AG der Betriebsart B4 wird nur unwesentlich schlechter als bei einem Abstand zum Boden von 0,506 m. Bei Betriebsart B1 verschlechtert sich dadurch die AG um 1,48%. Eine Freibordhöhe, welche ungefähr der halben Wellenhöhe, aller Betriebsarten entspricht, hat sich als gut erwiesen. Für Betriebsart B1, müsste bei einem Neigungswinkel von 20° eine Anpassung der vertikalen Verschiebung und des Winkels stattfinden. Eine Anpassung an den Füllstand ist nicht unbedingt nötig.

6.1.4 Horizontale Verschiebung

Die Auswertung dieser Versuchsreihe ist in Tabelle 22 dargestellt. Für Betriebsarten B1 und B2 ergibt sich für eine horizontalen Verschiebung von 0,2 m die beste AG. Bei den Betriebsarten B3 und B4 liefert eine horizontale Verschiebung von 0,4 m die besten Ergebnisse.

Es zeigt sich, dass kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Abstand zur Rückwand und Absorber-Güte besteht. Das Verhalten in Bezug auf die Absorptionsfähigkeit ähnelt der vorangegangenen Untersuchung, in welcher der Abstand zum Boden verringert wurde. Es ist jedoch zu erkennen, dass die besseren Werte für die Absorber-Güte nur bei einem gegebenen Abstand zur Rückwand erreicht werden. Zwischen den beiden Amplituden 0,4 m und 0 m kann die AG, aber auch schlechter sein als wenn die Platte direkt an der Rückwand anliegt.

Für die Betriebsarten B1 und B2 wurde ein Optimum gefunden. Bei den Betriebsarten B2 und B4 ändert sich die Absorber-Güte nur wenig mit Abstand zur Rückwand. Bei diesen beiden Betriebsarten beträgt der Füllstand 1 m.

Die Annahme, dass die Absorber-Güte der ersten Betriebsart mit kleinerem Abstand zur Rückwand besser werden könnte, wurde hier bestätigt.

α in°	vV in m	hV in m	AGB1 in %	AGB3 in %	AGB2 in %	AGB4 in %
25	0,245	0,4	9,73	13	8,45	12,36
25	0,245	0,3	9,38	14,76	8,32	12,64
25	0,245	0,2	8,9	16,67	8,05	12,93
25	0,245	0,1	9,67	13,71	8,13	12,67
25	0,245	0	12,57	13,55	8,13	12,6
Referenz			9,733	13	8,45	12,36

Tabelle 22: **Auswertung:** Variation der horizontalen Verschiebung, bei einem ausgewählten Neigungswinkel und konstanten Abstand zum Boden. Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.

Ein Abstand zu Rückwand sollte also vorhanden sein, da nie der Bestwert erreicht wird, wenn die Platte direkt an der Rückwand anliegt. Dies geht auch bereits aus der zweiten Versuchsreihe hervor (Kapitel 6.1.2). Für die weiteren Versuche wird für die Vergleichbarkeit, das gemeinsame Optimum verwendet, welches bei 0,4 m liegt. Aufgrund der besseren Ergebnisse wird der Abstand zwischen Rückwand und Kopf der Platte für die nächsten Versuche beibehalten. Damit ist auch die Annahme von Bauck und Hansen bestätigt.

6.1.5 Öffnungen und Wabenstruktur

Es werden die Simulationsfälle für die Zusatz Geometrien der Platte ausgewertet. Als erstes werden die Simulationsfälle für die Öffnungen ausgewertet. Im Anschluss wird auf die Auswertung der Versuche für die Wabenstruktur eingegangen.

In Tabelle 23 sind die Ergebnisse für die Versuchsreihe mit Öffnungen zu sehen. Bei Betriebsart B1 haben viele große Öffnungen zu den besten Ergebnissen geführt. Die Wellen der Betriebsart B3 werden mit wenigen großen Öffnungen am besten gedämpft. Bei den Betriebsarten B2 und B4 funktionieren viele kleine Öffnungen am besten. Das gemeinsame Optimum sind hier wenige kleine Öffnungen, mit denen die nächsten Simulationen durchgeführt werden. Bei Betriebsart B1 sind wenige kleine Öffnungen nur minimal (0,02%) schlechter als viele große, somit tritt bei Betriebsart B1, bei Wahl vieler großer Öffnungen kaum eine Verschlechterung der AG ein. Die AG der Betriebsart B3 wird auch nur unwesentlich schlechter als im Optimalfall. Mit den Öffnungen wird die Absorber-Güte der ersten und vierten Betriebsart verbessert. Die Absorber-Güten der dritten und zweiten Betriebsart verschlechtern sich nur wenig.

nL	nW	D in m	AGB1 in %	AGB3 in %	AGB2 in %	AGB4 in %
4	3	0,1	9,55	13,47	8,47	12,07
8	6	0,05	9,88	13,36	8,63	12,18
8	6	0,1	9,53	14,27	8,67	12,38
Referenz			9,733	13	8,45	12,36
Konstant: $\alpha= 25^\circ$; $hV= 0,4m$; $vV= 0,245m$						

Tabelle 23: **Auswertung:** Variationen der Öffnungen bei einem ausgewählten Neigungswinkel und konstanten Abstand zur Rückwand. Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.

Die Welle transmittiert durch die Öffnungen. Nach dem Durchqueren der Öffnungen wird die Welle an der Rückwand reflektiert. Der reflektierte Teil der Welle kann jedoch nicht wieder komplett in den Hauptteil des Wellenkanals gelangen, da die Platte dies verhindert.

Für die Untersuchung einer möglichen Diffraktion wird der Betrag der Partikelgeschwindigkeiten der Betriebsart B2 mit $nL = 8$, $nW = 6$ und $D = 0,05m$ vor und hinter der Platte in einer Höhe von $z = 0,8m$ gemessen. Es zeigt sich, dass der Betrag der Partikelgeschwindigkeiten hinter der Platte geringer ist als vor der Platte (siehe **Anhang C**). Eine Verringerung der Partikelgeschwindigkeit kann auf eine Abnahme der Wellenamplitude (siehe Gleichung (2.5)) zurückzuführen sein. Es muss jedoch beachtet werden, dass die Partikelgeschwindigkeit zusätzlich vom Wasser, welches durch die Öffnungen fließt, beeinflusst wird. Das Wasser, welches nach Auflaufen auf die Platte durch die Öffnungen fließt, fällt von oben auf die Wasseroberfläche. Dies könnte zu einer Erhöhung der Partikelgeschwindigkeit führen. Des Weiteren muss beachtet werden, dass die Partikelgeschwindigkeit auch mit der Wellenkreisfrequenz verknüpft ist. Dies bedeutet, dass sich mit Änderung der Partikelgeschwindigkeit auch alle durch die Dispersionsrelation (siehe Gleichung (2.2)) verbundenen Größen ändern können. Die Wassertiefe wird nicht geändert, also können sich nur die Wellenkreisfrequenz oder die Amplitude ändern. Der Einfluss einer möglichen Diffraktion kann hier nicht genau überprüft werden.

In Tabelle 24 ist die Auswertung der Versuchsreihe für die zusätzliche Aufrauung durch eine Wabenstruktur dargestellt. Bei allen Betriebsarten außer bei Betriebsart B3 liefert die Wabenstruktur bessere Ergebnisse, wenn zusätzlich die Öffnungen eingeschaltet sind. Es zeigt sich das mit und ohne Öffnungen bei jeder Betriebsart eine Verschlechterung der Absorber-Güte auftritt. Nur bei Betriebsart B4 mit Waben und Öffnungen tritt eine leichte Verbesserung der AG ein. Daher werden die Waben für die nächsten Untersuchungen nicht mehr verwendet.

Waben	Öffnungen	AGB1 in %	AGB3 in %	AGB3 in %	AGB4 in %
ja	nein	11,133	13,822	8,683	12,31
ja	ja	10,833	14,622	8,633	11,978
Referenz		9,55	13,47	8,47	12,07
Konstant: $\alpha = 25^\circ$; $hV = 0,4m$; $vV = 0,245m$; $nL = 4$; $nW = 3$; $D = 0,1m$					

Tabelle 24: **Auswertung:** Waben bei einem ausgewählten Neigungswinkel und konstanten Abstand zur Rückwand mit/ohne Öffnungen. Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.

Durch die Wabenstruktur sollte aufgrund der höheren Oberflächenrauheit eine erhöhte Energiedissipation stattfinden. Es zeigt sich jedoch, dass die Wabenstruktur in fast jedem Fall zu schlechteren Ergebnissen führt. Es könnte sein, dass der Teil der Wellen, welcher ohne zugeschaltete Waben durch die Öffnungen transmittieren kann an der Oberfläche der Waben reflektiert wird. Aufgrund der zugeschalteten Wabenstruktur werden die Öffnungen zum Teil blockiert.

6.2 Auswertung der Simulationsfälle für die Halbschalenstruktur

Im Folgenden werden die Simulationsfälle für den Strandabsorber mit zusätzlichen Halbschalenstrukturen ausgewertet.

6.2.1 Durchmesser der Halbschalenstrukturen

Die Auswertung für die Variation des Durchmessers der Halbschalenstrukturen ist in Tabelle 25 zu finden.

Bei den Halbschalenstrukturen zeigt sich, dass Betriebsart B1 und B3 am besten bei einem Nenndurchmesser von 160 mm gedämpft werden. Für Betriebsart B2 wird der beste Wert bei einem Nenndurchmesser von 140 mm erreicht. Der Beste Wert für Betriebsart B4 wird bei einem Nenndurchmesser von 80 mm erreicht.

Ein größer werdender Nenndurchmesser führt bei Betriebsart B1 und B3 zu besseren Absorber-Güten, wenn der Nenndurchmesser von 140 mm außer Acht gelassen wird. Die Betriebsart B4 erreicht mit kleiner werdendem Nenndurchmesser immer bessere werdende AG-Werte. Bei Betriebsart B2 ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Nenndurchmesser und AG zu erkennen. Auf Betriebsart B1 und B2 hat eine Variation des Nenndurchmessers im Vergleich zu den Betriebsarten B3 und B4 einen geringeren Einfluss. Betriebsart B3 und B4 erfahren wesentlich größere Schwankungen in der AG bei Variation des Nenndurchmessers.

Das Hinzuschalten der Halbschalen führt bei Betriebsart B1 und B3 im Vergleich zum Referenzfall zu einer signifikanten Verbesserung der AG. Bei der Betriebsart B2 wird nur eine geringfügige Verbesserung erzielt. Die Betriebsart B4 wird mit eingeschalteten Öffnungen und Platte besser gedämpft als mit eingeschalteten Öffnungen, Platte und Halbschalen. Dies geht aus einem Vergleich zwischen Referenzfall und Bestfall der AG der vierten Betriebsart hervor.

DN in mm	AGB1 in %	AGB3 in %	AGB2 in %	AGB4 in %
160	8,033	12,387	9,05	13,667
140	8,35	12,844	8,233	13,489
120	8,217	12,756	8,467	12,911
100	8,283	13,6	8,55	12,444
80	8,883	14,867	8,417	12,156
Referenz	9,55	13,47	8,47	12,07
Konstant: $\alpha = 25^\circ$; $hV = 0,4\text{m}$; $vV = 0,245\text{m}$; $nL = 4$; $nW = 3$; $D = 0,1\text{m}$; Kaskadenanzahl= 5				

Tabelle 25: **Auswertung:** Variation des Durchmessers der Halbschalenstrukturen. Betriebsarten: B1, B2, B3 und B4.

Das gegensätzliche Verhalten bei den Betriebsarten in Bezug auf den Zusammenhang zwischen Nenndurchmesser und Absorber-Güte könnte mit dem Füllstand zusammenhängen. Die Betriebsarten B1 und B3 besitzen beide einen Füllstand von 0,5 m. Die Betriebsarten B2 und B4 besitzen beide einen Füllstand von 1m. Die Wellen der Betriebsarten B2 und B4 nehmen durch den größeren Füllstand auch mehr Reihen von Halbschalen wahr. Durch eine

größere Reihe von Halbschalen existieren mehr Oberflächen, an denen die Wellen reflektiert werden können.

Für die weiteren Berechnungen wird der Nenndurchmesser von 160 mm beibehalten. Dadurch kommt es bei Betriebsart B4 zwar zu einer starken Verschlechterung der AG. Die Betriebsarten B1 und B3 werden aber wesentlich besser gedämpft und bei Betriebsart B2 ergibt sich in jedem Fall eine Verschlechterung der AG. Hier wird sich also eher auf Betriebsart B1 und B3 konzentriert.

Ein Vergleich der Auslenkung der freien Oberfläche für die Fälle Platte mit Öffnungen und Platte mit Öffnungen und Halbschalenstrukturen ist im **Anhang B** unter **Abbildung 33** bis **Abbildung 36** zu finden. Die Messungen stammen von der Messstelle, welche einen Meter von der Platte entfernt ist. Für die Auslenkung der freien Oberfläche im Fall „Öffnungen“ entsprechen die Einstellungen dem in Kapitel 6.1.5 gewählten Fall mit $nL = 3$, $nW = 4$ und $D = 0,1m$. Für die Auslenkung der freien Oberfläche entsprechen die Einstellungen den in Tabelle 25 dargestellten Fällen mit $DN = 160mm$ und $DN = 80mm$.

Es ist zu erkennen, dass bei Betriebsart B1 mit DN160 die größte Verbesserung auftritt. Sowohl das Wellental als auch der Wellenberg sind relativ nah am idealen Verlauf. Bei Betriebsart B2 ist kaum ein Unterschied zwischen DN80 und dem Fall ohne Halbschalen festzustellen. Bei Betriebsart B3 ist zu sehen, dass mit DN80 und dem Fall ohne Halbschalen eine Überlagerung der eintretenden Welle mit einer reflektierten Welle anderer Frequenz stattfindet. Dadurch entstehen vor allem im Bereich des Wellenbergs komplexe Überlagerungen. Mit DN160 kommt es zwar mit der Zeit zu einem Anstieg des Wellenbergs, aber das Wellental wird besser dargestellt. Außerdem ist der Einfluss einer reflektierten Welle mit anderer Frequenz im Wellenberg weniger erkennbar. Bei Betriebsart B4 gibt es kaum einen Unterschied zwischen dem Fall mit Öffnungen und dem Fall mit DN80. Mit DN80 werden Wellental und Wellenberg nur geringfügig besser dargestellt. Bei allen Betriebsarten ist eine Phasenverschiebung, zwischen idealer und simulierter Welle, zu erkennen. Die „Cross-correlation“-Funktion wird in den dargestellten Graphen nicht verwendet.

6.2.2 Anzahl der Halbschalenstrukturen

Die Auswertung für die Variation der Kaskadenanzahl ist in Tabelle 26 abgebildet. Bei Betriebsart B1 und B3 ergibt sich der Bestwert für eine Kaskadenanzahl von zwei. Für Betriebsart B2 und Betriebsart B4 wird ein Optimum bei einer Kaskadenanzahl von drei erreicht.

Eine Variation der Kaskadenanzahl hat auf die Absorber-Güte der Betriebsart B3 im Vergleich zu den anderen Betriebsarten die geringste Wirkung. Die Absorber-Güten der Betriebsarten B1, B2 und B4 erfahren eine wesentlich größere Veränderung, bei Variation der Kaskadenanzahl.

Kaskadenanzahl	AGB1 in %	AGB3 in %	AGB2 in %	AGB4 in %
5	8,033	12,378	9,05	13,667
4	8,033	12,289	8,883	13,578
3	8,167	12,311	8,65	13,178
2	7,683	12,267	9,117	13,244
Referenz	8,033	12,387	9,05	13,667
Konstant: $\alpha=25^\circ$; $hV= 0,4m$; $vV= 0,245m$; $nL= 4$; $nW= 3$; $D= 0,1m$; $DN= 160mm$				

Tabelle 26: **Auswertung:** Variation der Kaskadenanzahl bei ausgewählten Nenndurchmesser. Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.

In dieser Versuchsreihe zeigt sich bei den Betriebsarten B1 und B3, dass eine Verringerung der Kaskadenanzahl im Schnitt zu einer Verbesserung der AG führt. Nur bei einer Kaskadenanzahl von drei verschlechtert sich die Absorber-Güte im Vergleich zu der vorangegangenen Kaskadenanzahl. Bei den Betriebsarten B2 und B4 ist ein proportionaler Zusammenhang zwischen kleiner werdender Kaskadenanzahl und kleiner werdender Absorber-Güte bis zu einer Kaskadenanzahl von zwei zu erkennen. Es kann hieraus also nicht abgeleitet werden ob ein kleinerer Nenndurchmesser immer zu einer besseren Absorption der Wellen führt.

6.2.3 Variation der Plattenlänge

Für diese Versuchsreihe sind die Ergebnisse in Tabelle 27 zu finden. Die Betriebsarten B1 und B3 werden mit einer Plattenlänge von 2,2 m am besten gedämpft. Für Betriebsart B2 ergibt sich der Bestwert bei einer Plattenlänge von 2,4 m.

vV in m	hV in m	L in m	AGB1 in %	AGB3 in %	AGB2 in %	AGB4 in %
0,245	0,4	2	8,033	12,289	8,883	13,578
0,160	0,218	2,2	7,65	11,822	8,933	13,578
0,080	0,037	2,4	7,967	13,6	8,783	13,733
Referenz			8,033	12,387	8,233	13,467
Konstant: $\alpha=25^\circ$; $nL= 4$; $nW= 3$; $D= 0,1m$; $DN= 160mm$; Kaskadenanzahl= 4						

Tabelle 27: **Auswertung:** Variationen der Plattenlänge bei einheitlicher Freibordhöhe und Neigungswinkel. Betriebsart: B1, B2, B3 und B4.

Bei einer Plattenlänge von 2,4 m könnte es durch den geringen Abstand zur Rückwand von 0,036 m wieder zu Luftpfehlungen, zwischen der Unterseite der Platte und der Wasseroberfläche, gekommen sein. Dies könnte begründen, warum die AG der Betriebsarten B1, B3 und B4 bei einer Plattenlänge von 2,4 m schlechter ist als bei einer Plattenlänge von 2,2 m. Fraglich ist dann nur, warum sich die AG bei Betriebsart B2 im Fall der 2,4 m langen Platte verbessert. Mit einer Plattenlänge von 2,4 m verschlechtert sich die AG der Betriebsart B2 sogar. Für Betriebsart B4 ergeben sich für eine Plattenlänge von 2 m und 2,2 m dieselben Absorber-Güten.

Aus dieser Untersuchung ergibt sich, dass eine längere Platte nicht unbedingt zu besseren Ergebnissen führt. Es muss aber beachtet werden, dass in dieser Untersuchung nicht nur die Plattenlänge geändert wurde. Die horizontale Verschiebung und die vertikale Verschiebung mussten angepasst werden, damit die Freibordhöhe von ungefähr 0,09 m eingehalten wird. Daher können die hier aufgezeigten Ergebnisse keinen genauen Zusammenhang zwischen Plattenlänge und AG liefern.

7 Fazit

Die Analysen des Absorbers haben teilweise Zusammenhänge zwischen Absorber-Güte und Absorbervarianten bzw. den geometrischen Einstellungen der Absorbervarianten zeigen können.

Als Erstes wurde die Platte ohne Öffnungen, Waben und Halbschalenstrukturen untersucht. Es wurde der Neigungswinkel, die horizontale Verschiebung und die vertikale Verschiebung variiert. Bei der Variation des Neigungswinkels der Platte zeigt sich, dass ein kleinerer Neigungswinkel nicht unbedingt zu einer besseren Absorber-Güte führt. Dies widerspricht der Theorie. Außerdem konnte gezeigt werden, dass alle Wellen als Sturzbrecher brechen. Dieses Verhalten entspricht der Iribarren-Zahl, welche sich bei den gewählten Betriebsarten und Neigungswinkeln ergibt. Bei der Untersuchung der vertikalen Verschiebung der Platte hat sich eine Freibordhöhe, welche ungefähr der halben Wellenhöhe aller Betriebsarten entspricht, als gut erwiesen. Die Untersuchung der horizontalen Verschiebung der Platte hat gezeigt, dass wenn die Platte an der Rückwand anliegt zwar nie die beste Absorber-Güte erzielt wird, ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Abstand zur Rückwand und Absorber-Güte konnte hier aber nicht abgeleitet werden.

Als Nächstes wurde die Platte mit zugeschalteten Öffnungen untersucht. Es wurden der Durchmesser und die Anzahl der Öffnungen variiert. Dabei hat sich gezeigt, dass sich die Absorber-Güte nur bei zwei der betrachteten Betriebsarten verbessert. Des Weiteren hat sich bei der Untersuchung der Öffnungen, in einem der untersuchten Fälle gezeigt, dass der Betrag der Partikelgeschwindigkeiten vor der Platte größer als hinter der Platte ist. Darauf folgend wurde die Platte mit eingeschalteten Öffnungen und Waben untersucht. Bei dieser Untersuchung hat sich nur bei einer der vier untersuchten Betriebsarten eine Verbesserung der Absorber-Güte ergeben. Zusätzlich wurden die Waben noch ohne zugeschaltete Öffnungen untersucht. Die Wabenstruktur hat ohne Öffnungen in jedem Fall zu einer Verschlechterung der Absorber-Güte geführt.

Als letztes wurde die Platte mit zugeschalteten Öffnungen und Halbschalen untersucht. Dabei wurde zunächst der Nenndurchmesser und dann die Kaskadenanzahl der Halbschalen variiert danach wurde die Plattenlänge verändert. Bei der Untersuchung der Halbschalen mit zugeschalteter Platte und Öffnungen haben die Variationen des Nenndurchmessers und der Kaskadenanzahl nicht in jedem Fall zu einer Verbesserung der Absorber-Güte geführt. Daher konnte hier kein eindeutiger, allgemeiner Zusammenhang abgeleitet werden. Bei der Untersuchung der Plattenlänge mit eingeschalteten Öffnungen und Halbschalen. Hat sich gezeigt, dass eine längere Platte nicht unbedingt zu einer besseren Absorber-Güte führt.

Die Platte und die Halbschalen haben zur größten Verbesserung der Absorber-Güte geführt. Die Öffnungen haben kaum zu einer Verbesserung der Absorber-Güte geführt. Die Waben haben im Schnitt die Absorber-Güte verschlechtert.

Der Absorber konnte nicht so ausgelegt werden, dass eine ausreichend gute Absorber-Güte für alle Betriebsarten erreicht wird. Daher wird für weitere Untersuchungen empfohlen sich auf höchstens zwei Betriebsarten zu konzentrieren, wobei eine der Betriebsarten gegenüber der anderen bevorzugt wird. Es könnten aber auch Kombinationen des hier untersuchten

Absorbers mit weiteren Absorbern ausprobiert werden, um alle Betriebsarten ausreichend dämpfen zu können.

Quellenverzeichnis

- [1] Wulf, P.: Vorlesungsskript zum Kurs BKWWA, Teil Wellentheorie, 2018.
- [2] Dean, R., Dalrymple, R.: Water waves mechanics for engineers and scientists. World Scientific, 1991. ISBN 9810204205. - - ISBN 9810204213 (pbk.).
- [3] Malcherek, A.: Gezeiten und Wellen die Hydromechanik der Küstengewässer. GWV Fachverlage GmbH, 2010. ISBN 978-3-8348-0787-8.
- [4] Streich, F.: Analogieversuch zur Quantenmechanik mit Wasserwellen, Staatsexamen, Universität Stuttgart, 18.10.2016.
- [5] Eltard, B., Fuhrman, D., et al.: Performance of interFoam on the simulation of progressive waves, Technical University of Denmark, 2018.
- [6] O.Verf.: Diffraction von Wasserwellen, [https://de.wikipedia.org/wiki/Diffraktion_\(Wasserwellen\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Diffraktion_(Wasserwellen)), Aufruf am 24.06.2020.
- [7] Laouar, R.: Analyse und numerische Simulation von freien Oberflächenwellen in der Gießkammer eines Druckgießprozesses, Bericht, Universität Kassel, 2015.
- [8] Wulf, P.: Persönliche Mitteilung vom 29.05.2020.
- [9] Warnecke, T.: Simulation und Optimierung eines Wellenabsorbers für den Wellenkanal der HAW, Studienarbeit, HAW Hamburg, 03.2019.
- [10] Bauck, C., Hansen, C.: Entwurf und Auslegung eines Wellenabsorbers für einen Wellenkanal, Hausarbeit, HAW Hamburg, 2012.
- [11] Wulf, P.: Vorlesungsskript zum Kurs Computational Fluid Dynamics (CFD) Kapitel Einführung, 09.2018.
- [12] Davidson, J., et al.: Implementation of an Open FOAM Numerical Wave Tank for Wave Energy Experiments, Conference Paper, 09.2015.
- [13] Wulf, P.: Vorlesungsskript zum Kurs Simulation in der Produktentwicklung Kapitel Design of Experiments (DoE) bzw. Statistische Versuchsplanung, 24.05.2016.
- [14] Clauss, G., Lehmann, E., et al.: Meerestechnische Konstruktionen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo, 1988. ISBN 978-3-662-08647-6

Anhang A Vollständig Auswertungsunterlagen

Betriebsart	α in°	vV in m	hV in m	AG1	AG2	AG3	AG in %
B1	15	0,200	0	0,0204	0,0189	0,0163	9,267
B1	20	0,100	0	0,0219	0,0212	0,0162	9,883
B1	25	0,000	0	0,0201	0,0186	0,0171	9,300
B1	30	0,000	0	0,02	0,0185	0,0145	8,833
Referenz, Reflexion Rückwand				0,0239	0,0299	0,0375	15,217

Betriebsart	α in°	vV in m	hV in m	AG1	AG2	AG3	AG in %
B3	15	0,200	0	0,0215	0,0231	0,0269	15,889
B3	20	0,100	0	0,0213	0,0228	0,0303	16,533
B3	25	0,000	0	0,0178	0,0188	0,0266	14,044
B3	30	0,000	0	0,0212	0,0222	0,0192	13,911
Referenz, Reflexion Rückwand				0,0225	0,0246	0,0378	18,867

Betriebsart	α in°	vV in m	hV in m	AG1	AG2	AG3	AG in %
B2	20	0,121	0	0,0191	0,0163	0,0221	9,583
B2	25	0,350	0	0,0223	0,0222	0,0262	11,783
B2	30	0,200	0	0,022	0,0191	0,0201	10,200
B2	35	0,050	0	0,023	0,0191	0,0179	10,000
Referenz, Reflexion Rückwand				0,0221	0,0218	0,0308	12,450

Betriebsart	α in°	vV in m	hV in m	AG1	AG2	AG3	AG in %
B4	20	0,121	0	0,0204	0,0171	0,0209	12,978
B4	25	0,350	0	0,0233	0,023	0,0303	17,022
B4	30	0,200	0	0,0203	0,0176	0,0233	13,600
B4	35	0,050	0	0,0176	0,0194	0,0223	13,178
Referenz, Reflexion Rückwand				0,0234	0,0232	0,0338	17,867

Tabelle 28: A1.1. Auswertungsunterlagen-Variation des Neigungswinkels ohne Abstand zur Rückwand.

Betriebsart	α in°	vV in m	hV in m	AG1	AG2	AG3	AG in %
B1	20	0,406	0,4	0,0276	0,0248	0,0306	13,833
B1	25	0,245	0,4	0,0200	0,0190	0,0194	9,733
B1	30	0,090	0,4	0,0201	0,0183	0,0253	10,617
Referenz, Reflexion Rückwand				0,0239	0,0299	0,0375	15,217

Betriebsart	α in°	vV in m	hV in m	AG1	AG2	AG3	AG in %
B3	20	0,406	0,4	0,0214	0,0211	0,0205	14,000
B3	25	0,245	0,4	0,0209	0,0200	0,0176	13,000
B3	30	0,090	0,4	0,0207	0,0237	0,0288	16,267
Referenz, Reflexion Rückwand				0,0225	0,0246	0,0378	18,867

Betriebsart	α in°	vV in m	hV in m	AG1	AG2	AG3	AG in %
B2	20	0,406	0,4	0,0201	0,0152	0,0190	9,050
B2	25	0,245	0,4	0,0174	0,0139	0,0194	8,450
B2	30	0,090	0,4	0,0169	0,0163	0,0192	8,733
Referenz, Reflexion Rückwand				0,0221	0,0218	0,0308	12,450

Betriebsart	α in°	vV in m	hV in m	AG1	AG2	AG3	AG in %
B4	20	0,406	0,4	0,0204	0,0176	0,0186	12,578
B4	25	0,245	0,4	0,0207	0,0169	0,0180	12,356
B4	30	0,090	0,4	0,0206	0,0175	0,0185	12,578
Referenz, Reflexion Rückwand				0,0234	0,0232	0,0338	17,867

Tabelle 29: A1.2. Auswertungsunterlagen-Variation des Neigungswinkels bei vorhandenem Abstand zur Rückwand.

Betriebsart	α in°	vV in m	hV in m	AG1	AG2	AG3	AG in %
B1	20	0,406	0,4	0,0276	0,0248	0,0306	13,833
B1	20	0,306	0,4	0,0246	0,0261	0,0170	11,283
B1	20	0,206	0,4	0,0259	0,0270	0,0208	12,283
B1	20	0,106	0,4	0,0253	0,0279	0,0177	11,817
B1	20	0	0,4	0,0198	0,0163	0,0134	8,250
B1	25	0,245	0,4	0,0200	0,0190	0,0194	9,733
B1	25	0,145	0,4	0,0229	0,0221	0,0229	11,317
B1	25	0,045	0,4	0,0290	0,0320	0,0196	13,433
B1	25	0	0,4	0,0264	0,0303	0,0167	12,233
B1	30	0,090	0,4	0,0201	0,0183	0,0253	10,617
B1	30	0,000	0,4	0,0284	0,0267	0,0283	13,900

Betriebsart	α in°	vV in m	hV in m	AG1	AG2	AG3	AG in %
B3	20	0,406	0,4	0,0214	0,0211	0,0205	14,000
B3	20	0,306	0,4	0,0210	0,0237	0,0192	14,200
B3	20	0,206	0,4	0,0210	0,0229	0,0253	15,378
B3	20	0,106	0,4	0,0212	0,0228	0,0262	15,600
B3	20	0	0,4	0,0212	0,0227	0,0205	14,311
B3	25	0,245	0,4	0,0209	0,0200	0,0176	13,000
B3	25	0,145	0,4	0,0207	0,0234	0,0259	15,556
B3	25	0,045	0,4	0,0209	0,0215	0,0164	13,067
B3	25	0	0,4	0,0210	0,0231	0,0328	17,089
B3	30	0,09	0,4	0,0207	0,0237	0,0288	16,267
B3	30	0	0,4	0,0208	0,0218	0,0185	13,578

Betriebsart	α in°	vV in m	hV in m	AG1	AG2	AG3	AG in %
B2	20	0,406	0,4	0,0201	0,0152	0,0190	9,050
B2	20	0,506	0,4	0,0177	0,0176	0,0193	9,100
B2	25	0,245	0,4	0,0174	0,0139	0,0194	8,450
B2	25	0,345	0,4	0,0182	0,0194	0,0188	9,400
B2	30	0,09	0,4	0,0169	0,0163	0,0192	8,733
B2	30	0,19	0,4	0,0186	0,0186	0,0177	9,150

Betriebsart	α in°	vV in m	hV in m	AG1	AG2	AG3	AG in %
B4	20	0,406	0,4	0,0204	0,0176	0,0186	12,578
B4	20	0,506	0,4	0,0203	0,0167	0,0184	12,311
B4	25	0,245	0,4	0,0207	0,0169	0,0180	12,356
B4	25	0,345	0,4	0,0200	0,0172	0,0194	12,578
B4	30	0,09	0,4	0,0206	0,0175	0,0185	12,578
B4	30	0,19	0,4	0,0207	0,0188	0,0244	14,200

Tabelle 30: A1.3. Auswertungsunterlagen-Vertikale Verschiebung.

Betriebsart	α in°	vV in m	hV in m	AG1	AG2	AG3	AG%
B1	25	0,245	0,4	0,0200	0,0190	0,0194	9,733
B1	25	0,245	0,3	0,0204	0,0186	0,0173	9,383
B1	25	0,245	0,2	0,0205	0,0195	0,0134	8,900
B1	25	0,245	0,1	0,0207	0,0200	0,0173	9,667
B1	25	0,245	0	0,0262	0,0249	0,0243	12,567

Betriebsart	α in°	vV in m	hV in m	AG1	AG2	AG3	AG%
B3	25	0,245	0,4	0,0209	0,0200	0,0176	13,000
B3	25	0,245	0,3	0,0208	0,0217	0,0239	14,756
B3	25	0,245	0,2	0,0207	0,0245	0,0299	16,689
B3	25	0,245	0,1	0,0207	0,0228	0,0182	13,711
B3	25	0,245	0	0,0210	0,0218	0,0182	13,556

Betriebsart	α in°	vV in m	hV in m	AG1	AG2	AG3	AG%
B2	25	0,245	0,4	0,0174	0,0139	0,0194	8,450
B2	25	0,245	0,3	0,0184	0,0127	0,0188	8,317
B2	25	0,245	0,2	0,0187	0,0125	0,0171	8,050
B2	25	0,245	0,1	0,0184	0,0140	0,0164	8,133
B2	25	0,245	0	0,0174	0,0130	0,0184	8,133

Betriebsart	α in°	vV in m	hV in m	AG1	AG2	AG3	AG%
B4	25	0,245	0,4	0,0207	0,0169	0,0180	12,356
B4	25	0,245	0,3	0,0206	0,0171	0,0192	12,644
B4	25	0,245	0,2	0,02	0,0171	0,0211	12,933
B4	25	0,245	0,1	0,0200	0,0174	0,0196	12,667
B4	25	0,245	0	0,0206	0,0181	0,0180	12,600

Tabelle 31: A1.4. Auswertungsunterlagen-Horizontale Verschiebung.

Betriebsart	vV in m	hV in m	α in°	nL	nW	D in m	AG1	AG2	AG3	AG in %
B1	0,245	0,4	25	4	3	0,1	0,0219	0,0207	0,0147	9,550
B1	0,245	0,4	25	8	6	0,05	0,0224	0,0216	0,0153	9,883
B1	0,245	0,4	25	8	6	0,1	0,0223	0,021	0,0139	9,533

Betriebsart	vV in m	hV in m	α in°	nL	nW	D in m	AG1	AG2	AG3	AG in %
B3	0,245	0,4	25	4	3	0,1	0,0205	0,0208	0,0193	13,467
B3	0,245	0,4	25	8	6	0,05	0,0207	0,0206	0,0188	13,356
B3	0,245	0,4	25	8	6	0,1	0,0206	0,0232	0,0204	14,267

Betriebsart	vV in m	hV in m	α in°	nL	nW	D in m	AG1	AG2	AG3	AG in %
B2	0,245	0,4	25	4	3	0,1	0,0178	0,0149	0,0181	8,467
B2	0,245	0,4	25	8	6	0,05	0,0174	0,016	0,0184	8,633
B2	0,245	0,4	25	8	6	0,1	0,0175	0,0166	0,0179	8,667

Betriebsart	vV in m	hV in m	α in°	nL	nW	D in m	AG1	AG2	AG3	AG in %
B4	0,245	0,4	25	4	3	0,1	0,0202	0,0165	0,0176	12,067
B4	0,245	0,4	25	8	6	0,05	0,0201	0,0167	0,018	12,178
B4	0,245	0,4	25	8	6	0,1	0,0197	0,0168	0,0192	12,378

Tabelle 32: A1.5. Auswertungsunterlagen-Öffnungen.

Betriebsart	vV in m	hV in m	α in°	Waben	Öffnungen	AG1	AG2	AG3	AG in %
B1	0,245	0,4	25	ja	ja	0,0239	0,025	0,0161	10,833
B1	0,245	0,4	25	ja	nein	0,0235	0,0255	0,0178	11,133

Betriebsart	vV in m	hV in m	α in°	Waben	Öffnungen	AG1	AG2	AG3	AG in %
B3	0,245	0,4	25	ja	ja	0,0205	0,0217	0,0236	14,622
B3	0,245	0,4	25	ja	nein	0,0206	0,0214	0,0202	13,822

Betriebsart	vV in m	hV in m	α in°	Waben	Öffnungen	AG1	AG2	AG3	AG in %
B2	0,245	0,4	25	ja	ja	0,0176	0,0161	0,0181	8,633
B2	0,245	0,4	25	ja	nein	0,0176	0,0162	0,0183	8,683

Betriebsart	vV in m	hV in m	α in°	Waben	Öffnungen	AG1	AG2	AG3	AG in %
B4	0,245	0,4	25	ja	ja	0,0199	0,0163	0,0177	11,978
B4	0,245	0,4	25	ja	nein	0,0202	0,017	0,0182	12,311

Tabelle 33: A1.6. Auswertungsunterlagen-Wabenstruktur. Geometrische Parameter der hier gewählten Öffnungen: $nL = 4$, $nW = 3$ und $D = 0,1m$.

Betriebsart	vV in m	hV in m	α in°	Waben	Öffnungen	DN in mm	nK	AG1	AG2	AG3	AG in %
B1	0,245	0,4	25	0	1	160	5	0,0186	0,0112	0,0184	8,033
B1	0,245	0,4	25	0	1	140	5	0,0193	0,0146	0,0162	8,350
B1	0,245	0,4	25	0	1	120	5	0,0199	0,0159	0,0135	8,217
B1	0,245	0,4	25	0	1	100	5	0,0206	0,0172	0,0119	8,283
B1	0,245	0,4	25	0	1	80	5	0,021	0,0186	0,0137	8,883

Betriebsart	vV in m	hV in m	α in°	Waben	Öffnungen	DN in mm	nK	AG1	AG2	AG3	AG in %
B3	0,245	0,4	25	0	1	160	5	0,0208	0,0178	0,0171	12,378
B3	0,245	0,4	25	0	1	140	5	0,0206	0,0186	0,0186	12,844
B3	0,245	0,4	25	0	1	120	5	0,0207	0,0186	0,0181	12,756
B3	0,245	0,4	25	0	1	100	5	0,0206	0,0189	0,0217	13,600
B3	0,245	0,4	25	0	1	80	5	0,0206	0,021	0,0253	14,867

Betriebsart	vV in m	hV in m	α in°	Waben	Öffnungen	DN in mm	nK	AG1	AG2	AG3	AG in %
B2	0,245	0,4	25	0	1	160	5	0,0219	0,0151	0,0173	9,050
B2	0,245	0,4	25	0	1	140	5	0,0195	0,0156	0,0143	8,233
B2	0,245	0,4	25	0	1	120	5	0,0187	0,0167	0,0154	8,467
B2	0,245	0,4	25	0	1	100	5	0,018	0,0168	0,0165	8,550
B2	0,245	0,4	25	0	1	80	5	0,0175	0,0159	0,0171	8,417

Betriebsart	vV in m	hV in m	α in°	Waben	Öffnungen	DN in mm	nK	AG1	AG2	AG3	AG in %
B4	0,245	0,4	25	0	1	160	5	0,022	0,0225	0,017	13,667
B4	0,245	0,4	25	0	1	140	5	0,0213	0,0217	0,0177	13,489
B4	0,245	0,4	25	0	1	120	5	0,0204	0,0195	0,0182	12,911
B4	0,245	0,4	25	0	1	100	5	0,02	0,017	0,019	12,444
B4	0,245	0,4	25	0	1	80	5	0,0197	0,0159	0,0191	12,156

Tabelle 34: A2.1. Auswertungsunterlagen-Variation des Durchmessers der Halbschalenstrukturen bei fester Kaskadenanzahl $nK=5$. Geometrische Parameter der hier gewählten Öffnungen: $nL = 4$, $nW = 3$ und $D = 0,1m$.

Betriebsart	vV in m	hV in m	α in°	Waben	Öffnungen	DN in mm	nK	AG1	AG2	AG3	AG in %
B1	0,245	0,4	25	0	1	160	5	0,0186	0,0112	0,0184	8,033
B1	0,245	0,4	25	0	1	160	4	0,0186	0,0108	0,0188	8,033
B1	0,245	0,4	25	0	1	160	3	0,0186	0,0115	0,0189	8,167
B1	0,245	0,4	25	0	1	160	2	0,0185	0,0095	0,0181	7,683

Betriebsart	vV in m	hV in m	α in°	Waben	Öffnungen	DN in mm	nK	AG1	AG2	AG3	AG in %
B3	0,245	0,4	25	0	1	160	5	0,0208	0,0178	0,0171	12,378
B3	0,245	0,4	25	0	1	160	4	0,0207	0,018	0,0166	12,289
B3	0,245	0,4	25	0	1	160	3	0,0209	0,018	0,0165	12,311
B3	0,245	0,4	25	0	1	160	2	0,0208	0,0181	0,0163	12,267

Betriebsart	vV in m	hV in m	α in°	Waben	Öffnungen	DN in mm	nK	AG1	AG2	AG3	AG in %
B2	0,245	0,4	25	0	1	160	5	0,0219	0,0151	0,0173	9,050
B2	0,245	0,4	25	0	1	160	4	0,021	0,0148	0,0175	8,883
B2	0,245	0,4	25	0	1	160	3	0,0208	0,0152	0,0159	8,650
B2	0,245	0,4	25	0	1	160	2	0,0219	0,0161	0,0167	9,117

Betriebsart	vV in m	hV in m	α in°	Waben	Öffnungen	DN in mm	nK	AG1	AG2	AG3	AG in %
B4	0,245	0,4	25	0	1	160	5	0,022	0,0225	0,017	13,667
B4	0,245	0,4	25	0	1	160	4	0,0218	0,0224	0,0169	13,578
B4	0,245	0,4	25	0	1	160	3	0,0212	0,0219	0,0162	13,178
B4	0,245	0,4	25	0	1	160	2	0,0208	0,0222	0,0166	13,244

Tabelle 35: A2.2. Auswertungsunterlagen-Variation der Kaskadenanzahl (nK). Geometrische Parameter der hier gewählten Öffnungen: $nL = 4$, $nW = 3$ und $D = 0,1m$.

Betriebsart	vV in m	hV in m	L in m	α in°	Waben	Öffnungen	DN in mm	nK	AG1	AG2	AG3	AG in %
B1	0,245	0,4	2	25	0	1	160	4	0,0186	0,0108	0,0188	8,033
B1	0,160	0,218	2,2	25	0	1	160	4	0,0186	0,0106	0,0167	7,650
B1	0,080	0,037	2,4	25	0	1	160	4	0,0187	0,0124	0,0167	7,967

Betriebsart	vV in m	hV in m	L in m	α in°	Waben	Öffnungen	DN in mm	nK	AG1	AG2	AG3	AG in %
B3	0,245	0,4	2	25	0	1	160	4	0,0207	0,018	0,0166	12,289
B3	0,160	0,218	2,2	25	0	1	160	4	0,0205	0,0171	0,0156	11,822
B3	0,080	0,037	2,4	25	0	1	160	4	0,0217	0,0215	0,018	13,600

Betriebsart	vV in m	hV in m	L in m	α in°	Waben	Öffnungen	DN in mm	nK	AG1	AG2	AG3	AG in %
B2	0,245	0,4	2	25	0	1	160	4	0,021	0,0148	0,0175	8,883
B2	0,160	0,218	2,2	25	0	1	160	4	0,0214	0,0143	0,0179	8,933
B2	0,080	0,037	2,4	25	0	1	160	4	0,0208	0,0145	0,0174	8,783

Betriebsart	vV in m	hV in m	L in m	α in°	Waben	Öffnungen	DN in mm	nK	AG1	AG2	AG3	AG in %
B4	0,245	0,4	2	25	0	1	160	4	0,0218	0,0224	0,0169	13,578
B4	0,160	0,218	2,2	25	0	1	160	4	0,0219	0,0225	0,0167	13,578
B4	0,080	0,037	2,4	25	0	1	160	4	0,022	0,0226	0,0172	13,733

Tabelle 36: A2.3. Auswertungsunterlagen-Variation der Plattenlänge. Geometrische Parameter der hier gewählten Öffnungen: $nL = 4$, $nW = 3$ und $D = 0,1m$.

Anhang B Auslenkung der freien Oberfläche

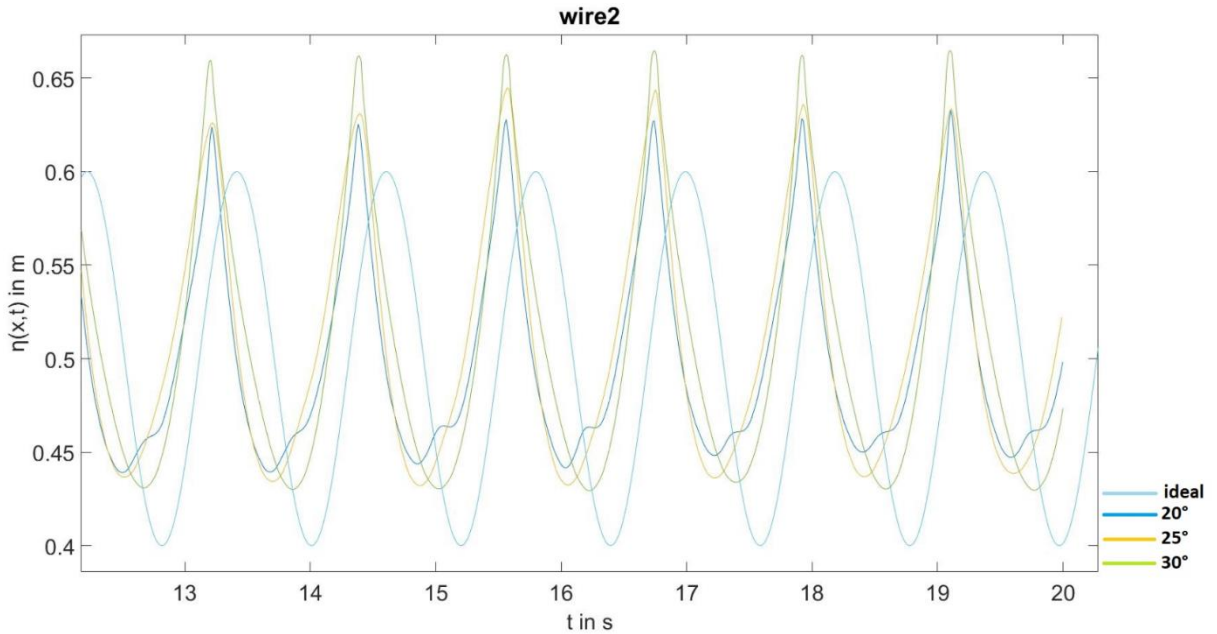


Abbildung 29: B1.1. Auslenkung der freien Oberfläche-B1. Variation des Neigungswinkels bei vorhandenem Abstand zur Rückwand. Gemessen an der Stelle $x = 2m$. Geometrische Parameter entsprechend Tabelle 29.

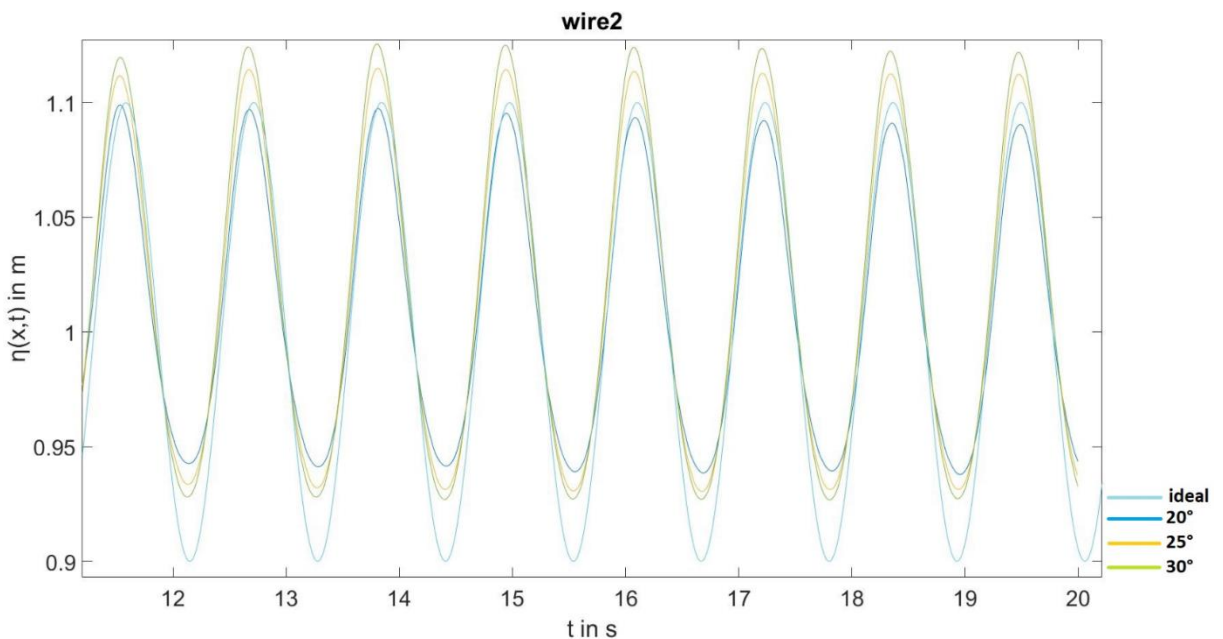


Abbildung 30: B1.2. Auslenkung der freien Oberfläche-B2. Variation des Neigungswinkels bei vorhandenem Abstand zur Rückwand. Gemessen an der Stelle $x = 2m$. Geometrische Parameter entsprechend Tabelle 29.

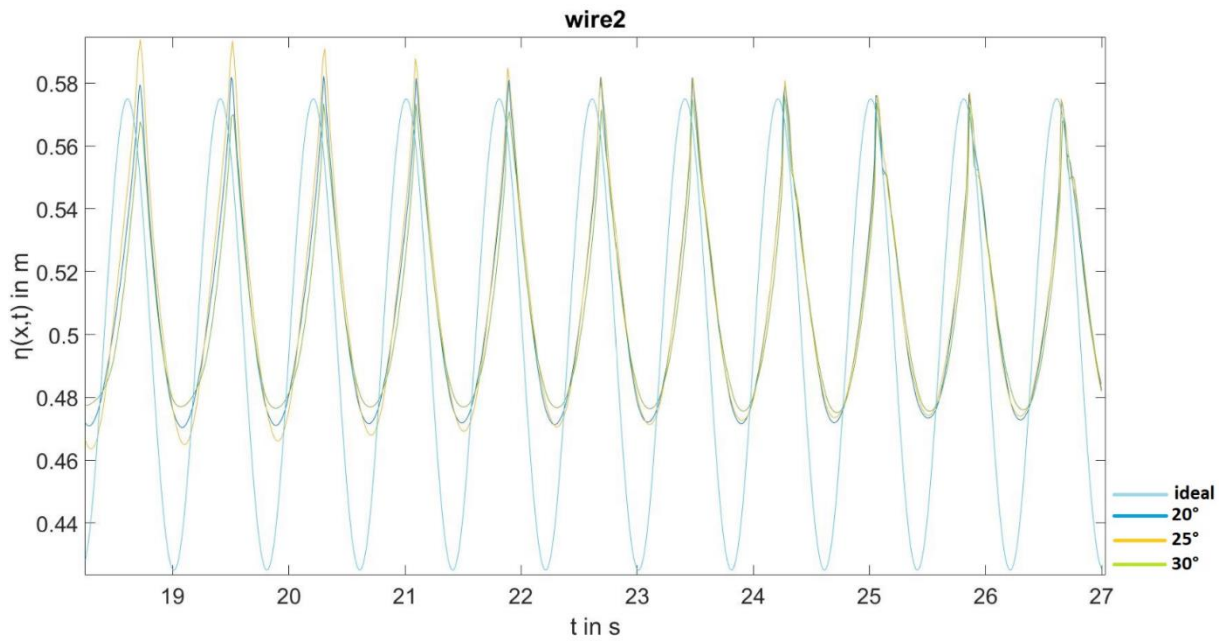


Abbildung 31: B1.3. Auslenkung der freien Oberfläche-B3, Variation des Neigungswinkels bei vorhandenem Abstand zur Rückwand. Gemessen an der Stelle $x = 2m$. Geometrische Parameter entsprechend Tabelle 29.

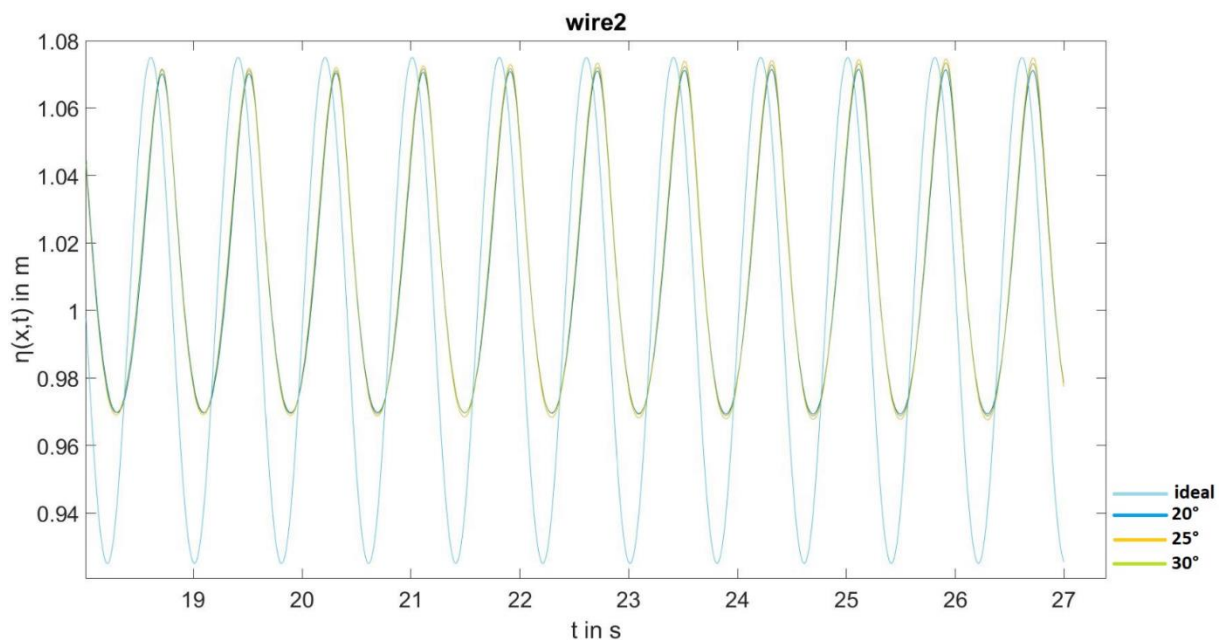


Abbildung 32: B1.4. Auslenkung der freien Oberfläche-B4, Variation des Neigungswinkels bei vorhandenem Abstand zur Rückwand. Gemessen an der Stelle $x=2m$. Geometrische Parameter entsprechend Tabelle 29.

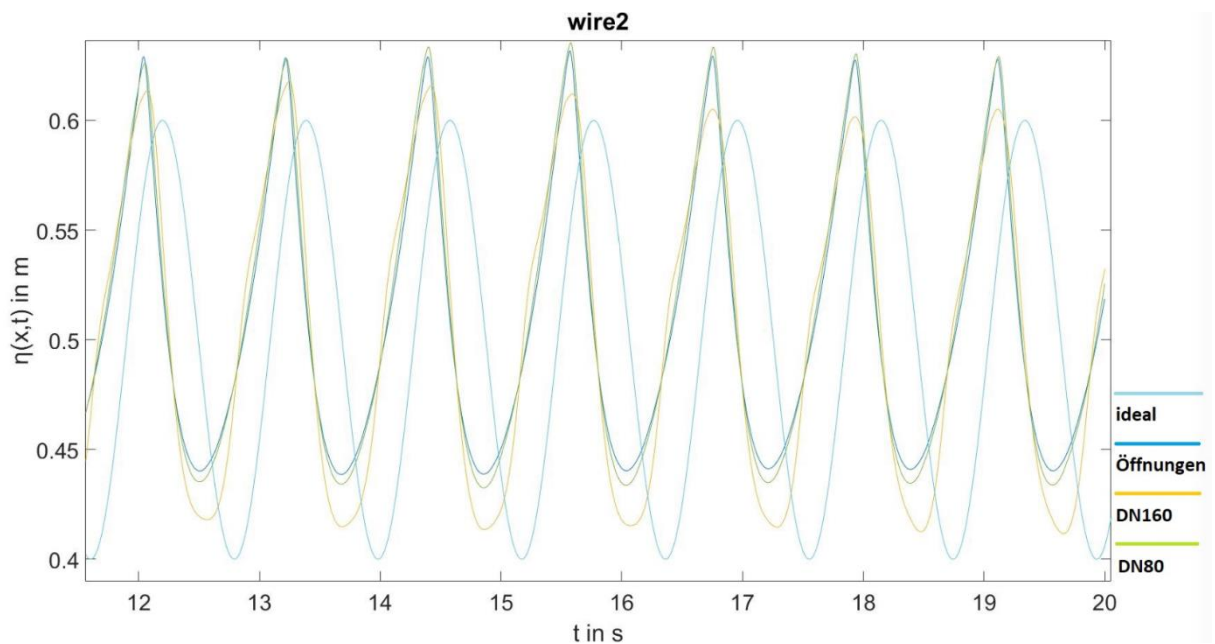


Abbildung 33: B2.1. Auslenkung der freien Oberfläche-B1. Vergleich zwischen Platte mit Öffnungen (siehe Tabelle 32 Fall: $nL = 4$, $nW = 3$ und $D = 0,1m.$) und Platte mit Öffnungen und Halbschalen (Geometrische Parameter nach Tabelle 34), bei verschiedenen Nenndurchmessern. Gemessen an der Stelle $x = 2m$.

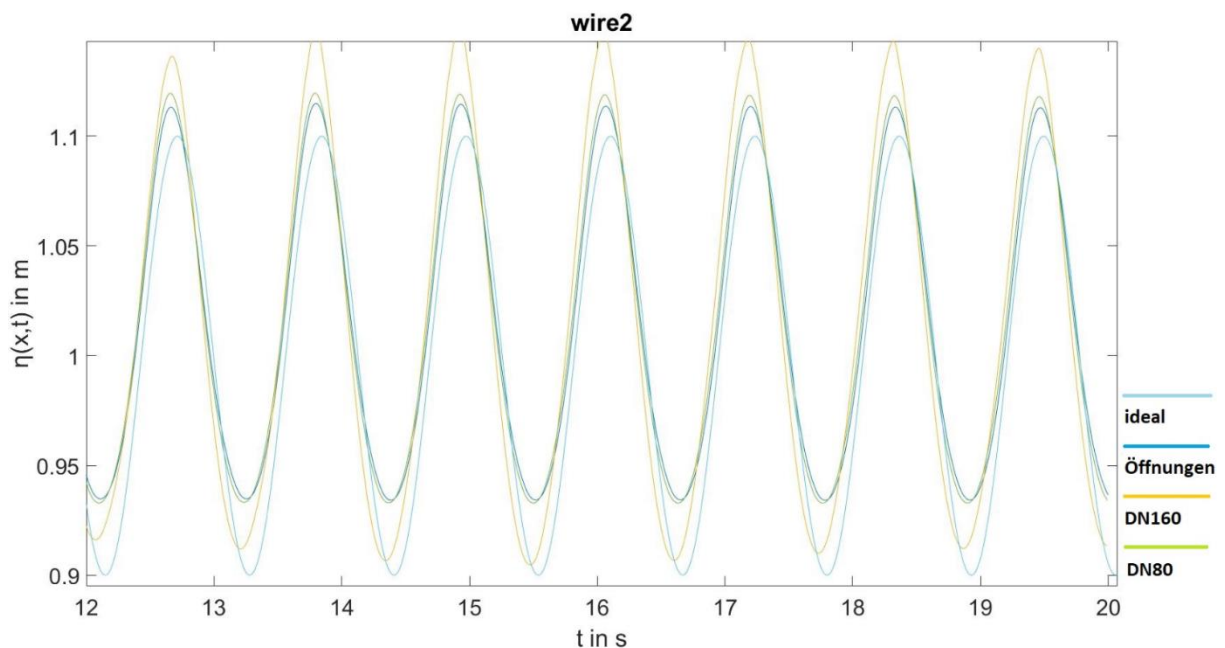


Abbildung 34: B2.2. Auslenkung der freien Oberfläche-B2. Vergleich zwischen Platte mit Öffnungen (siehe Tabelle 32 Fall: $nL = 4$, $nW = 3$ und $D = 0,1m.$) und Platte mit Öffnungen und Halbschalen (Geometrische Parameter nach Tabelle 34), bei verschiedenen Nenndurchmessern. Gemessen an der Stelle $x = 2m$.

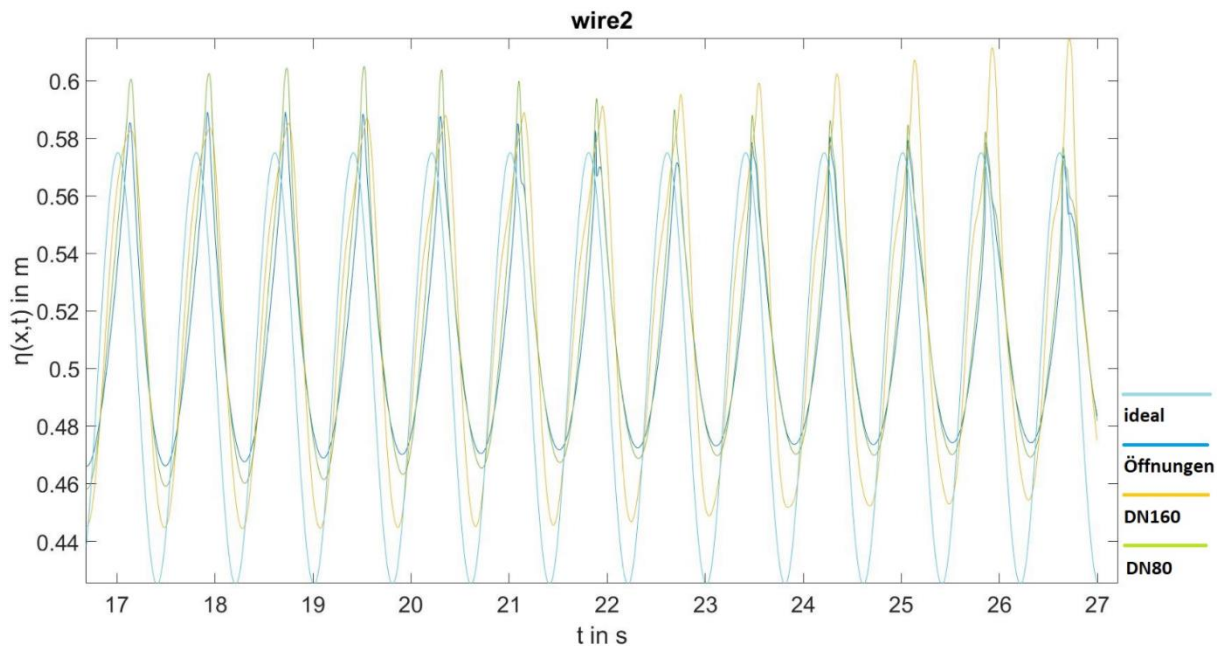


Abbildung 35: B2.3. Auslenkung der freien Oberfläche-B3. Vergleich zwischen Platte mit Öffnungen (siehe Tabelle 32 Fall: $nL = 4$, $nW = 3$ und $D = 0,1m.$) und Platte mit Öffnungen und Halbschalen (Geometrische Parameter nach Tabelle 34), bei verschiedenen Nenndurchmessern. Gemessen an der Stelle $x = 2m$.

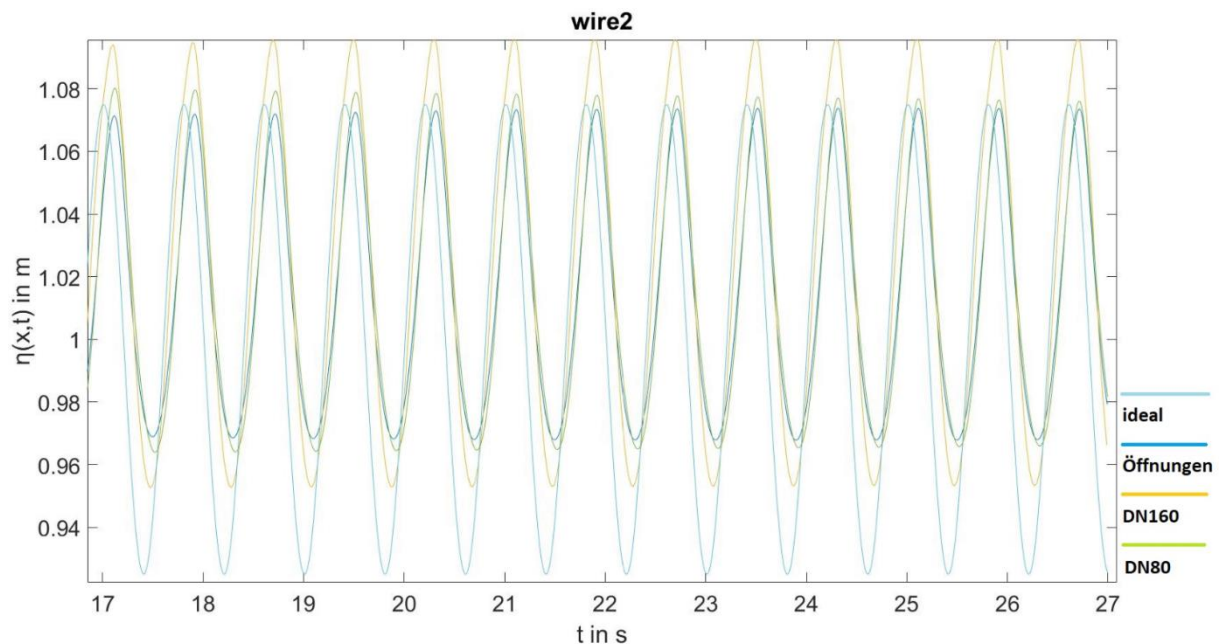


Abbildung 36: B2.4. Auslenkung der freien Oberfläche-B4. Vergleich zwischen Platte mit Öffnungen (siehe Tabelle 32 Fall: $nL = 4$, $nW = 3$ und $D = 0,1m.$) und Platte mit Öffnungen und Halbschalen (Geometrische Parameter nach Tabelle 34), bei verschiedenen Nenndurchmessern. Gemessen an der Stelle $x=2m$.

Anhang C Partikelgeschwindigkeit vor und hinter der Platte



Abbildung 37 C1. Partikelgeschwindigkeiten über $t = 20s$ für Betriebsart B2 mit $nL = 8$, $nW = 6$ und $D = 0,05m$ vor ($x_1 = -0,4m$) und hinter der Platte ($x_2 = 1,4m$) in einer Höhe von $z = 0,8m$ gemessen.

Anhang D Anhang der CD

1. OpenFOAM-Modelle

- BetriebsartB1
- BetriebsartB2
- BetriebsartB3
- BetriebsartB4

2. Auswertungsprogramme

3. Vollständige Auswertungsunterlagen

4. Dokumentation

- Abbildungen
- Verwendete Quellen

Der Anhang zur Arbeit befindet sich auf CD und kann beim Erstgutachter eingesehen werden.